

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Magisterský studijní program:

strojírenská technologie

Zaměření:

obrábění a montáž

Analyticko-syntetická studie na souboru řezných destiček z keramiky

The analytical-synthetic study of the set of ceramic cutting tips

KOM - 1079

Jaroslav Kovalčík

Vedoucí práce: Ing. Leoš Holub, CSc.

Konzultant: Ing. Jiří Karásek

Počet stran:.....104

Počet tabulek:.....33

Počet obrázků:.....18

Počet příloh:.....6

Počet modelů nebo jiných příloh:..... 1

Datum: 20. května 2008

Analyticko-syntetická studie na souboru řezných destiček z keramiky**ANOTACE:**

V úvodní části této práce je souhrn všech dosud používaných řezných materiálů, a to i těch, dnes již téměř nepoužívaných. Teoretická část se zabývá rozdělením a vlastnostmi především řezné keramiky, dále pak slinutých karbidů a poznatky o jejich břitech. V praktické části je provedena dlouhodobá zkouška trvanlivosti vybraného druhu řezné keramiky a její následné vyhodnocení. Další důležitou částí této práce je Syntéza a analýza všech dosud změřených destiček z řezné keramiky a slinutých karbidů, jejich vyhodnocení a patřičné závěry.

The analytical-synthetic study of the set of ceramic cutting tips**ANNOTATION:**

In the preamble of this work there is a summary of all cutting materials used, including those that are not very much used these days. The theoretical part undertakes to explain the characteristics of cutting ceramics, above all, that of vitreous carbide and any information about its cutting edges. In practical part there is a focus on made long-time testing of the durability of choosen methods of cutting ceramics, followed by an interpretation. An important part of this work is the synthesis and analysis of all measured laminations made of cutting ceramics and vitreous carbides, their interpretations and appropriate conclusions.

Klíčová slova: ŘEZNÁ KERAMIKA, SLINUTÉ KARBIDY TRVANLIVOST, OBRÁBĚNÍ

Desetinné třídění:

Zpracovatel: TU Liberec

Dokončeno: 2008

Archivní označení zprávy:

Počet stran: 104

Počet tabulek: 33

Počet obrázků: 18

Počet příloh: 6

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

"Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury".

V Liberci, dne 20. 5. 2008

Podpis:.....

PROHLÁŠENÍ

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít svou diplomovou práci či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 20. 5. 2008

Podpis:.....

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych touto cestou poděkovat Ing. Leoši Holubovi, CSc. za cenné připomínky a rady k vedení diplomové práce. Dále děkuji panu Kordíkovi a panu Pulcovi z laboratoře KOM za pomoc při praktickém měření.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
1. ÚVOD.....	12
2. NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY.....	13
2. 1 NÁSTROJOVÉ OCELI	13
2. 2 RYCHLOŘEZNÉ OCELI.....	14
2. 3 STELLITY	14
2. 4 CORONITE	14
2. 5 SLINUTÉ KARBIDY	14
2. 6 CERMETY	15
2. 7 MINERALOKERAMICKÉ MATERIÁLY	15
2. 8 KUBICKÝ NITRID BORU (CBN).....	16
2. 9 POLYKRISTALICKÝ DIAMANT (PKD).....	16
3. TEORETICKÁ STUDIE	17
3.1 TEORETICKÁ STUDIE ŘEZNÉ KERAMIKY	17
3.1.1 <i>Historie řezné keramiky</i>	17
3.1.2 <i>Rozdělení a použití řezné keramiky</i>	18
3.1.2.1 Obecné rozdělení.....	18
3.1.2.1.1 Oxidová řezná keramika	19
3.1.2.1.1.1 Čistá oxidová řezná keramika.....	19
3.1.2.1.1.2 Polosměsná oxidová řezná keramika	19
3.1.2.1.1.3 Směsná oxidová řezná keramika	19
3.1.2.1.2 Nitridová řezná keramika	19
3.1.2.1.3 Keramický kompozit	20
3.1.2.2 Rozdělení keramiky společnosti SAINT-GOBAIN, s.r.o.	20
3.1.2.2.1 Oxidová řezná keramika	21
3.1.2.2.1.1 DISAL 100 (D100).....	21
3.1.2.2.1.2 DISAL 210, 220 (D210, D220)	21
3.1.2.2.1.3 DISAL 310, 320 (D310, D320)	21
3.1.2.2.2 Nitridová řezná keramika	21
3.1.2.2.2.1 DISAL 400, 420, 450, 460 (D400, D420, D450, D460)	21
3.1.3 <i>Vlastnosti řezné keramiky</i>	22
3.1.3.1 Struktura	22
3.1.3.2 Řezné vlastnosti	22
3.1.3.3 Mechanické a fyzikální vlastnosti.....	23
3.1.3.3.1 Hustota	23
3.1.3.3.2 Pevnost v ohybu, tahu a tlaku	23
3.1.3.3.3 Tvrdost.....	24
3.1.3.3.4 Lomová houževnatost	25
3.1.3.3.5 Žáruvzdornost.....	26
3.1.3.3.6 Tepelná vodivost.....	26
3.1.3.3.7 Teplotní délková roztažnost	27
3.1.3.3.8 Odolnost proti tepelným rázům	27
3.1.4 <i>Výroba keramických řezných destiček</i>	27
3.1.4.1 Základní informace o procesu výroby	27
3.1.4.2 Výroba destiček z oxidové keramiky.....	28
3.1.4.3 Výroba destiček z nitridové keramiky	29
3.1.5 <i>Užití řezné keramiky v procesech obrábění</i>	29
3.1.5.1 Soustružení	29
3.1.5.1.1 Základní směrnice pro soustružení keramikou	29
3.1.5.1.2 Volba základních parametrů při soustružení	30
3.1.5.1.3 Volba tvaru destičky při soustružení keramikou.....	31

3.1.5.2 Frézování.....	31
3.2 TEORETICKÁ STUDIE SLINUTÝCH KARBIDŮ (SK).....	32
3.2.1 Úvod.....	32
3.2.2 Charakteristika SK.....	32
3.2.3 Rozdělení a charakteristika skupin SK.....	32
3.2.3.1 Nepovlakované SK.....	32
3.2.3.1.1 Skupina K.....	33
3.2.3.1.2 Skupina P.....	33
3.2.3.1.3 Skupina M.....	33
3.2.3.2 Povlakované SK.....	33
3.2.4 Charakteristické vlastnosti SK.....	34
3.3 STUDIE BŘITU ŘEZNÉHO NÁSTROJE.....	35
3.3.1 Trvanlivost řezných nástrojů.....	35
3.3.1.1 Kriteria otupení nástroje.....	35
3.3.1.2 Závislost trvanlivosti bříty na řezných podmínkách.....	37
3.3.1.3 Vliv geometrie nástroje na trvanlivost bříty.....	40
3.3.1.4 Zkoušky trvanlivosti.....	42
3.3.1.4.1 Krátkodobé zkoušky trvanlivosti.....	42
3.3.1.4.2 Dlouhodobé zkoušky trvanlivosti.....	43
3.3.2 Opatření bříty řezného nástroje.....	44
3.3.2.1 Otěr bříty.....	45
3.3.2.1.1 Abrazie (brusný otěr).....	45
3.3.2.1.2 Adheze.....	45
3.3.2.1.3 Difúze.....	46
3.3.2.1.4 Oxidace.....	46
3.3.2.2 Plastická deformace.....	47
3.3.2.3 Křehký lom.....	47
3.3.3 Destičky s dvojitou fazetkou.....	47
3.3.4 Tvorba nárůstku.....	48
4. PRAKTICKÁ MĚŘENÍ.....	49
4.1 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU.....	49
4.1.1 Použitá zařízení.....	49
4.1.2 Obráběný materiál.....	50
4.1.3 Použitá řezná keramika.....	50
4.1.4 Stanovení řezných podmínek.....	51
4.1.5 Upnutí obrobku.....	51
4.1.6 Metodika zpracování výsledků měření.....	51
4.2 MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ HODNOT.....	52
4.2.1 Břit 1.....	52
4.2.2 Břit 2.....	54
4.2.3 Břit 3.....	56
4.3 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU.....	58
4.3.1 Stanovení VB_{krit}	58
4.3.2 Stanovení trvanlivostí jednotlivých břitů.....	58
4.3.3 Výpočet konstant a exponentu Taylorova vztahu.....	59
4.3.3.1 Výpočet exponentu m a úhlu strmosti křivky.....	59
4.3.3.2 Výpočet konstant Taylorova vztahu.....	60
4.3.3.2.1 Klasický Taylorův vztah.....	60
4.3.3.2.2 Komplexní Taylorův vztah.....	61
4.3.4 Řezné rychlosti pro dané trvanlivosti.....	61
4.3.4.1 Klasický Taylorův vztah.....	61
4.3.4.2 Komplexní Taylorův vztah.....	62
4.3.5 Trvanlivosti při daných řezných rychlostech.....	62
4.3.5.1 Klasický Taylorův vztah.....	62
4.3.5.2 Komplexní Taylorův vztah.....	63
4.4 CELKOVÉ SHRNUTÍ EXPERIMENTU.....	64
4.5 ZÁVĚR PRAKTICKÉHO MĚŘENÍ.....	65
5. SYNTÉZA NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	66

5.1 SHRUTÍ PODMÍNEK MĚŘENÍ A JEHO METODIKA.....	66
5.1.1 Použitá řezná keramika.....	66
5.1.2 Řezné podmínky.....	66
5.1.3 Tvrdost obrobků.....	67
5.1.4 Použitá zařízení.....	67
5.1.5 Obráběný materiál.....	68
5.1.6 Metodika zpracování výsledků.....	68
5.1.6.1 Výpočet vstupních parametrů.....	69
5.1.6.1.1 Výpočet řezné rychlosti.....	69
5.1.6.1.2 Výpočet trvanlivosti.....	69
5.1.6.2 Vyhodnocení odhadem.....	70
5.1.6.2.1 Teoretické výpočty.....	70
5.1.6.2.2 Aplikace metody přibližného vyhodnocení.....	70
5.1.6.3 Vyhodnocení výpočtem – metoda nejmenších čtverců.....	70
5.1.6.3.1 Teoretické výpočty.....	70
5.1.6.3.2 Aplikace metody nejmenších čtverců.....	73
5.1.6.4 Tabulkové vyhodnocení obou metod.....	74
5.2 ŘEZNÁ KERAMIKA.....	75
5.2.1 Vlastní zpracování naměřených hodnot.....	75
5.2.1.1 Konstanty Taylorova vztahu.....	75
5.2.1.2 Trvanlivosti při nastavených otáčkách.....	77
5.2.1.3 Řezné rychlosti pro dané trvanlivosti.....	79
5.2.1.4 Trvanlivosti pro dané řezné rychlosti.....	81
5.2.2 Závěrečné shrnutí syntézy řezné keramiky.....	83
5.3 SLINUTÉ KARBIDY.....	84
5.3.1 Vlastní zpracování naměřených hodnot.....	84
5.3.1.1 Konstanty Taylorova vztahu.....	84
5.3.1.2 Trvanlivosti při nastavených otáčkách.....	84
5.3.1.3 Řezné rychlosti pro dané trvanlivosti.....	85
5.3.1.4 Trvanlivosti pro dané řezné rychlosti.....	85
5.3.2 Závěrečné shrnutí syntézy slinutých karbidů.....	86
6. ANALÝZA DESTIČEK.....	87
6.1 Úvod.....	87
6.2 PODMÍNKY VYHODNOCENÍ.....	87
6.3 OXIDOVÁ KERAMIKA.....	88
6.3.1 KY1615.....	88
6.3.2 D210.....	88
6.3.3 D230.....	89
6.3.4 D220.....	90
6.3.5 Toshiba.....	90
6.3.6 C-TM-1-5.....	91
6.4 NITRIDOVÁ KERAMIKA.....	92
6.4.1 FMG122C.....	92
6.4.2 D400.....	92
6.4.3 ALPHA SIALON.....	93
6.4.4 NS260, NS260C.....	93
6.4.5 FMG121C.....	94
6.4.6 FMG134C.....	94
6.4.7 D420.....	95
6.4.8 G-6.....	95
6.4.9 SN300.....	96
6.4.10 P1.....	96
6.4.11 SL800.....	97
6.4.12 A3.....	98
6.4.13 A4.....	98
7. ZÁVĚR.....	99
7.1 ZÁVĚR PRAKTICKÉHO MĚŘENÍ V POROVNÁNÍ S OSTATNÍMI DESTIČKAMI.....	99

7.2 ZÁVĚR ANALYTICKO-SYNTETICKÉ STUDIE	99
7.2.1 Vliv dvojité fazetky na řezné vlastnosti	99
7.2.2 Porovnání oxidové a nitridové keramiky	100
7.2.3 Porovnání keramiky se slinutými karbidy	101
7.3 NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU STUDIE KERAMIKY	101
7.4 CHYBY MĚŘENÍ	102
7.5 TAYLORŮV VZTAH	103
7.6 POROVNÁNÍ METODIK ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	103
7.7 ZAČLENĚNÍ KERAMIKY DO PROGRESIVNÍCH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ	104
7.8 PŘÍNOS PRO PRAXI	104

Seznam použitých symbolů a zkratek

a	$[10^{-6}^{\circ}\text{C}]$	součinitel teplotní roztažnosti
a		koeficient lineární regrese
a	[mm]	tloušťka třísky
v_c	[m/min]	řezná rychlost
a_p	[mm]	hloubka řezu
f	[mm/ot]	posuv na otáčku
C_T	[min]	konstanta Taylorova vztahu
C_v	$[\text{m min}^{-1}]$	konstanta Taylorova vztahu
D	[mm]	průměr obrobku
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
λ	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	měrná tepelná vodivost
CNC		počítačem řízené stroje
HIP		vysokoteplotní isostatické lisování
b		koeficient lineární regrese
b	[mm]	šířka třísky
CBN		kubický nitrid boru
PKD		polykrystalický diamant
v		počet stupňů volnosti
L_(a)1,2		interval spolehlivosti hodnot koeficientu a
L_(b)1,2		interval spolehlivosti hodnot koeficientu b
m		exponent Taylorova vztahu
n	$[\text{min}^{-1}]$	otáčky
n		počet měření
n_s	$[\text{min}^{-1}]$	otáčky vřetene skutečné
R_m	[MPa]	pevnost v tahu
HV		tvrdost podle Vickerse
HB		tvrdost podle Brinella
s		směrodatná odchylka
s_a		směrodatná odchylka koeficientu a
s_b		směrodatná odchylka koeficientu b
T	[min]	trvanlivost nástroje
t_α		kritická hodnota Studentova rozdělení

ISO		mezinárodní norma
ČSN		Česká státní norma
KOM		Katedra obrábění a montáže
VB_k	[mm]	kriteriální opotřebení hřbetu
VR	[mm]	radiální opotřebení
VB	[mm]	opotřebení hřbetu
v_T	[m/min]	řezná rychlost odpovídající dané trvanlivosti
x_v		exponent komplexního Taylorova vztahu
y_v		exponent komplexního Taylorova vztahu
Si₃N₄		nitrid křemíku
TiC		karbid titanu
TiCN		karbonitrid titanu
TiN		nitrid titanu
Y₂O₃		oxid yttriumu
Co		kobalt
CoO		oxid kobaltu
Al₂O₃		oxid hlinitý
ZrO₂		oxid zirkoničitý
SiC		karbid titanu
α		krystalografická modifikace
α	[°]	úhel strmosti přímky
α₀	[°]	ortogonální úhel hřbetu řezného nástroje
β		krystalografická modifikace
β	[°]	úhel břitu řezného nástroje
β₀	[°]	ortogonální úhel břitu řezného nástroje
γ	[°]	úhel čela řezného nástroje
γ₀	[°]	ortogonální úhel čela řezného nástroje
ε_R	[°]	úhel špičky řezného nástroje
κ_R	[°]	úhel nastavení hlavního ostří řezného nástroje
λ_S	[°]	úhel sklonu ostří řezného nástroje
r_ε	[mm]	poloměr špičky ostří
SK		slinutý karbid
WC		karbid wolframu
K_{IC}	[MPa · m ^{1/2}]	kritická intenzita napětí

D210	označení keramiky firmy Saint-Gobain
D210-PG	označení keramiky firmy Saint-Gobain
D210f	označení keramiky firmy Saint-Gobain
D220	označení keramiky firmy Saint-Gobain
D220-PG	označení keramiky firmy Saint-Gobain
D220f	označení keramiky firmy Saint-Gobain
D230	označení keramiky firmy Saint-Gobain
D400	označení keramiky firmy Saint-Gobain
D400f	označení keramiky firmy Saint-Gobain
D420	označení keramiky firmy Saint-Gobain
A3	označení keramiky z Turecka
A4	označení keramiky z Turecka
FMG121C	Označení keramiky rakouského výzkumného ústavu Seibersdorf
FGM122C	Označení keramiky rakouského výzkumného ústavu Seibersdorf
FMG134C	Označení keramiky rakouského výzkumného ústavu Seibersdorf
Alpha Sialon	označení keramiky firmy Enterprise Ireland
G-6	označení keramiky firmy Enterprise Ireland
NS260	označení keramiky firmy Sumitomo
NS260C	označení keramiky firmy Sumitomo
P1	označení keramiky neznámo odkud
SL800	označení keramiky firmy Sangyong
SN300	označení keramiky firmy Ceramtec
KY1615	označení keramiky firmy Kennametal
Toshiba	označení keramiky z Japonska
C-TM-1-5	označení keramiky neznámo odkud
AC300G	označení slinutého karbidu firmy Sumitomo
AC700G	označení slinutého karbidu firmy Sumitomo

1. Úvod

V dnešní době automatizované výroby, kdy se stále vyvíjejí obráběcí stroje a ve velké míře jsou používány CNC stroje, je důležité ekonomické hledisko a velká produktivita práce závisící na řezné rychlosti, hloubce řezu a posuvu. Proto je v popředí zájmu rozvoje obrábění výzkum již známých řezných materiálů, nikoli hledání absolutně nových

Z celé řady řezných materiálů, jako jsou slinuté karbidy, cermety, diamanty, rychlořezná ocel, si řezná keramika získala své specifické postavení ve strojírenském průmyslu pro její charakteristické vlastnosti a možnosti využití. V posledních letech byly výrazně zlepšeny některé vlastnosti řezné keramiky díky stálému vědeckému zájmu o tento druh materiálu, což vede ke stále většímu využití ve strojírenském průmyslu.

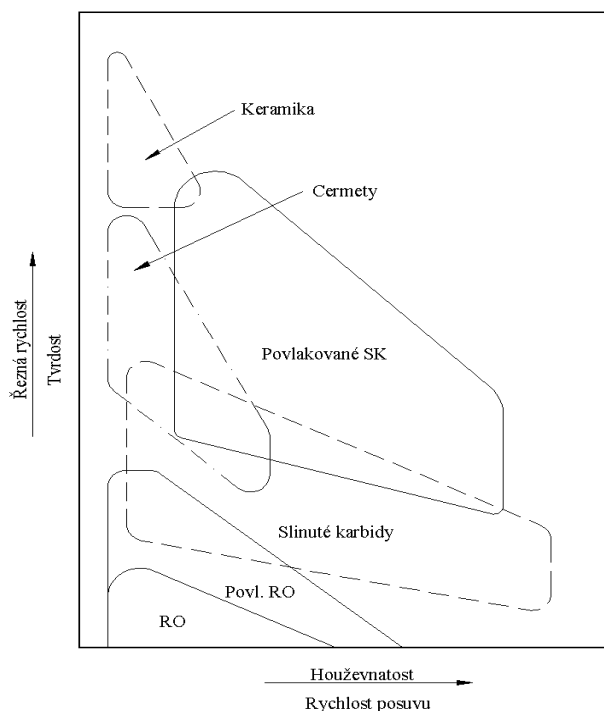
Mezi hlavní oblasti použití řezné keramiky patří obrábění šedé litiny, žárovzdušných slitin a v některých případech také ocelí. Pro každou tuto oblast je svými charakteristickými vlastnostmi vhodné používat určitý druh keramiky, aby se dosáhlo požadované kvality, optimálních podmínek a dobrého ekonomického hlediska.

Tato diplomová práce sjednocuje a vyhodnocuje poznatky předešlých diplomových prací katedry KOM, TU v Liberci o řezné keramice a slinutých karbidech při obrábění šedé litiny. V neposlední řadě se tato práce zabývá měřením destičky z řezné keramiky a následným porovnáním řezných vlastností s předešlými výsledky.

Celá řada měření byla prováděna na souboru destiček z řezné keramiky vyráběné společností SAINT-GOBAIN ADVANCED CERAMICS, s.r.o., Turnov v České republice, která se výrobou tohoto materiálu zabývá od roku 1981. Dále pak na řezných destičkách jiných světových výrobců, jejich vzájemné porovnávání, vyhodnocení.

2. Nástrojové materiály [7], [14]

Na *Obr.1* jsou schematicky znázorněny hlavní oblasti aplikace současných nejpoužívanějších materiálů pro řezné nástroje (bez supertvrdých řezných materiálů), vyjádřené závislostí mezi řeznou rychlostí a posuvovou rychlostí.



Obr.1 : Rozsah použitelnosti nástrojových materiálů

2.1 Nástrojové oceli

Legovaná i nelegovaná uhlíková ocel byly v průběhu 19.století nejlepším řezným materiálem. Tento materiál byl relativně tvrdý, ale se zvyšující se teplotou na břitě, která vznikala i při relativně nízkých řezných rychlostech, velmi rychle měkl.

Prvním, opravdu zlepšeným řezným materiálem, který se přiblížil rychlořezné oceli, byla tak zvaná „Mushetova ocel“. Tato ocel byla legována wolframem a umožňovala zdvojnásobení produkce při soustružení, odolávala vyšším teplotám a řezné rychlosti se pohybovaly již kolem 10 m/min.

2. 2 Rychlořezné oceli

O rozvoj dalších materiálů se zasloužil především pan Taylor společně s panem Maunselem, kteří provedli desítky pokusů a povýšili tím obrábění na vědu. Oproti uhlíkovým ocelím, které snášely teploty pouze 250°C se podařilo u rychlořezné oceli zvýšit tuto odolnost až na 600°C, a to při vyšších řezných rychlostech.

2. 3 Stellity

Stellity jsou označovány jako neželezné slitiny, jejichž základem je hlavně kobalt, chrom, wolfram atd. Tyto „slévárenské slitiny“ byly velmi tvrdé, měly relativně vysokou tvrdost za tepla, cca 800°C a velmi vysokou odolnost proti abrazivnímu opotřebení, byly však velmi křehké a pro výrobu nepoužitelné. V dnešní době se používají většinou jen na opravu nástrojů z rychlořezných ocelí. Slévárenské slitiny jsou předchůdci slinutých karbidů.

2. 4 Coronite

Materiál Coronite je úplně novým řezným materiálem, v němž se slučují houževnatost rychlořezné oceli s odolností proti opotřebení, která je vlastní slinutým karbidům.

Tento řezný materiál byl vyvinut hlavně pro obrábění oceli. Je však použitelný i pro obrábění slitin titanu, různých lehkých neželezných kovů a také šedé litiny.

Typickými charakteristickými znaky jsou vynikající jakost obrobeného povrchu, dobré vlastnosti pro ostření nástroje a dlouhá trvanlivost břitu při vysoké produktivitě obrábění.

2. 5 Slinuté karbidy

Slinutý karbid je rovněž znám pod jmény spěkaný kov nebo karbid wolframu. Slinutý karbid znamená revoluci v podobě produktů práškové metalurgie, které

obsahovaly více než 90% tvrdých karbidů a kovové pojivo. Výchozí prášek byl slisován a spékán, přičemž došlo k roztavení kovového pojiva, které však spojilo řezný materiál.

Slinuté karbidy snášejí teploty až 800, 900, někdy i 1000°C, maximální řezné rychlosti jsou 6 m/s, což není příliš vysoká řezná rychlost (360 m/min). Mohou však být použity pro vysoké posuvové rychlosti a pro přerušované řezy. Tyto materiály se často povlakuji, čímž dosahují vyšších tvrdostí a řezných rychlostí.

2. 6 Cermety

Cermet je společný název pro všechny tvrdé kovokeramické materiály, u nichž jsou tvrdé složky tvořeny karbidem titanu (TiC), karbonitridem titanu (TiCN) nebo nitridem titanu (TiN). Tento název vznikl zkrácením anglických slov CERamic-METal, což znamená keramické částice s kovovým pojivem. Je sporné, je-li cermet produkt práškové metalurgie, slinutým karbidem, nebo jsou-li všechny slinuté karbidy vlastně cermety. V praxi lze cermety považovat za slinuté karbidy, zhotovené na bázi titanu, místo na bázi karbidů wolframu.

Tento materiál dosahuje řezných rychlostí 8 m/s a snáší teploty až 1500°C.

Vlastnosti cermetů:

- Vysoká odolnost proti opotřebení hřbetu a opotřebení ve tvaru žlábků na čele,
- vysoká chemická stabilita a tvrdost za tepla,
- malý sklon k vytváření nárůstku,
- malý sklon k oxidačnímu opotřebení.

2. 7 Mineralokeramické materiály

Tímto názvem se označuje řezná keramika. Tyto materiály jsou tvrdé, mají vysokou tvrdost za tepla a reagují chemicky s materiálem obrobku. Zaručují dlouhou trvanlivost bříty a mohou být použity při vysokých řezných rychlostech. Tento materiál snáší teploty až do 1200°C, řezné rychlosti se pohybují kolem 15 m/s (900 m/min).

2. 8 Kubický nitrid boru (CBN)

CBN je zvlášť tvrdý materiál, jehož tvrdost překonává již jen diamant. CBN má vynikající výkonnost, vykazuje mimořádnou tvrdost za tepla i při extrémních teplotách (2000°C), velkou odolnost proti abrazivnímu opotřebení a při obrábění má vždy dobrou chemickou stabilitu. CBN je relativně křehký, houževnatější a tvrdší než keramika, ale nemá tak dobrou tepelnou a chemickou odolnost.

CBN by měl být používán zásadně pro obrábění materiálů o tvrdosti nad 48HRC. Jsou-li obrobky příliš měkké, musíme počítat s mimořádně velkým opotřebením bříty – čím tvrdší je materiál, tím menší je opotřebení bříty nástroje.

Nástroji z CBN se obrábí ocelové výkovky, kalená ocel a litina, povrchově kalené obrobky, žárovzdorné materiály, slinované materiály na bázi kobaltu a železa.

Vydrží teploty až 1500°C a maximální řezné rychlosti až 3 m/s (180 m/min).

2. 9 Polykrystalický diamant (PKD)

PKD je nejtvrdějším známým materiálem, který dosahuje tvrdostí kolem 10000HV. Jeho mimořádná tvrdost umožňuje odolávat vysokému abrazivnímu opotřebení.

V porovnání s jinými řeznými materiály snáší tento malé teploty, maximálně do 600°C, maximální řezné rychlosti jsou 15 m/s (900 m/min).

Omezení pro použití PKD:

- Teploty v oblasti řezání nesmí překročit 600°C,
- pro svoji afinitu není PKD použitelný k obrábění železných materiálů,
- PKD není vhodný pro obrábění houževnatých materiálů s vysokou pevností.

3. Teoretická studie

3.1 Teoretická studie řezné keramiky

3.1.1 Historie řezné keramiky [2]

Firma Degussa vyvinula při výzkumných činnostech založených na náhradě slinutých karbidů až během druhé světové války první keramický materiál použitelný pro řezný nástroj. Aplikace těchto nově vyvinutých materiálů byla ke své vysoké křehkosti omezena pouze pro nepřerušované řezání a z důvodu, že technologie nedokázala zhotovit nástroj požadovaných vlastností.

Na odstranění nedostatků jako nízká ohybová pevnost a odolnost proti tepelným rázům byl zaměřen výzkum, a tak se až koncem 50. let 20. století začala řezná keramika v třískovém obrábění prosazovat.

Koncem 50. let 20. století se objevuje první řezná keramika na bázi Al_2O_3 s malým množstvím slinovacích přísad (cca 1%), např. MgO. Tyto materiály jsou specifické vynikající odolností proti opotřebení při obrábění vysokými řeznými rychlostmi, avšak mají špatnou odolnost proti vydrolování ostří.

Další vývoj byl zaznamenán v 70. letech 20. století, kdy keramika na bázi Al_2O_3 -TiC měla zlepšit odolnosti proti vydrolování a spolehlivost řezných nástrojů. Ohybová pevnost a lomová houževnatost oproti svému předchůdci Al_2O_3 značně vzrostla. Z důvodu snížení ceny a zvýšení produktivity se postupem času slinovací proces změnil z vysokoteplotního lisování na vysokoteplotní izostatické lisování.

Kompozity Al_2O_3 vyztužené vlákny SiC (whiskery) se začínají objevovat v polovině 80. let 20. století. Tento typ má stejnou ohybovou pevnost jako Al_2O_3 -TiC, avšak vyšší lomovou houževnatost. V důsledku vyšší odolnosti proti oxidaci a mechanického zpevnění se vlákny SiC zvýší odolnost proti vydrolování a vylamování ostří. Přidáním těchto vláken má za negativní následek vyšší opotřebení hřbetu a to, že vlákna mají tendenci reagovat se slitinami železa.

Obchodní název Sialon nese druh keramiky na bázi nitridu křemíku a oxidu hlinitého Si_3N_4 - Al_2O_3 - Y_2O_3 . Při porovnání s keramikou na bázi Al_2O_3 jsou méně odolné

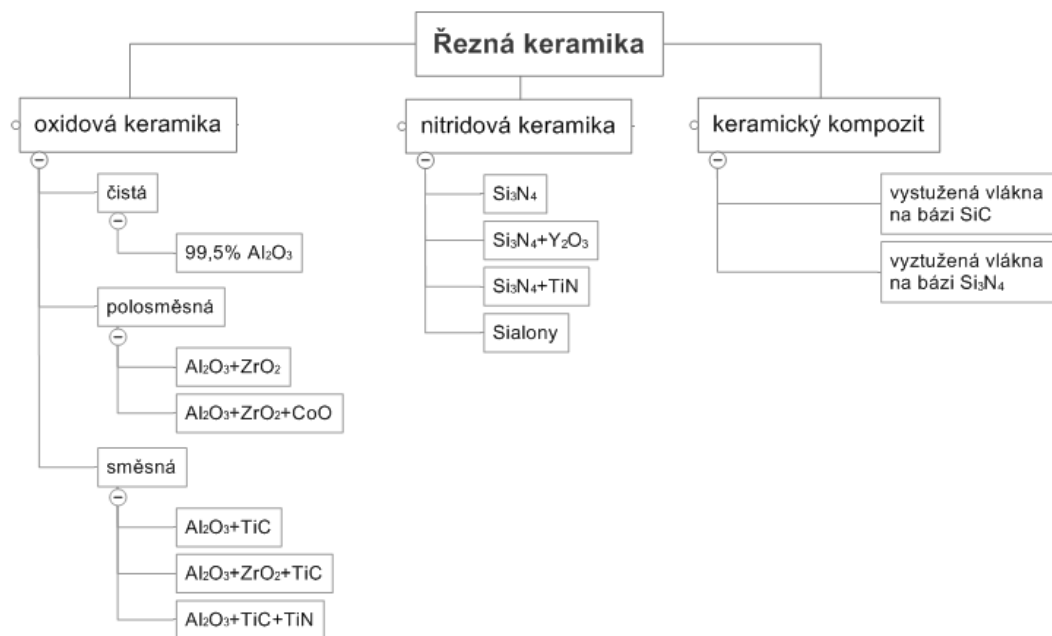
proti opotřebení při obrábění ocelí a tvárných litin, avšak na straně druhé se pracuje až při dvounásobných rychlostech posuvu.

Je nutné zmínit, že vývojem řezné keramiky v České republice se zabývá od roku 1981 společnost Saint-Gobain Advanced Ceramics, s.r.o., Turnov. Společnost za tuto dobu vyvinula keramiku s vysokou rázovou pevností, dobrou odolností proti opotřebení řezných hran za vysokých teplot, skvělou odolností proti teplotním šokům. Řezná keramika nese registrovanou obchodní značku DISAL.

3.1.2 Rozdělení a použití řezné keramiky

3.1.2.1 Obecné rozdělení

Rozdělení keramických materiálů není stanoveno žádnou normou, tak jako u slinutých karbidů. Je však všeobecně používáno a přijímáno rozdělení podle schématu na *Obr.2*.



Obr.2 : Obecné rozdělení řezné keramiky

3.1.2.1.1 Oxidová řezná keramika [9]

3.1.2.1.1.1 Čistá oxidová řezná keramika

Tato keramika na bázi čistého oxidu hlinitého Al_2O_3 má malou tepelnou vodivost, pevnost a houževnatost. Tyto vlastnosti jsou příčinou vylamování břitu při nepříznivých podmínkách obrábění. Zvýšit houževnatost můžeme přidáním zirkonu.

Použití těchto keramik je pro jemné dokončovací soustružení šedé litiny a nízkolegovaných ocelí vysokými řeznými rychlostmi.

3.1.2.1.1.2 Polosměsná oxidová řezná keramika

Tento druh řezné keramiky je založen na bázi $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$, kde se přísadou ZrO_2 dosahuje jemnozrnné struktury a lepších pevnostních hodnot.

Použití těchto keramik je především při obrábění cementačních a zušlechtěných ocelí a při obrábění litin.

3.1.2.1.1.3 Směsná oxidová řezná keramika

Řezná keramika na bázi Al_2O_3 s přidáním kovové fáze má zlepšenou tepelnou vodivost, čímž jsou méně náchylné k lomu. Výhodou je i dobrá houževnatost, nesrovnatelná se slinutými karbidy. Mezi aditiva patří karbid titančitý, nitrid titanu v rozmezí 20–40%. Při obrábění touto keramikou se dosahuje vysoké jakosti obrobeného povrchu a vyšší produktivity.

Použití je především pro obrábění tvrzené litiny, při soustružení kalené oceli a jemném soustružení.

3.1.2.1.2 Nitridová řezná keramika [9]

Tato neoxidová keramika na bázi nitridu křemíku Si_3N_4 má v porovnání s oxidovou keramikou na bázi Al_2O_3 lepší houževnatost a chování při tepelném šoku, horší chemickou stabilitu při obrábění ocelí. Keramika z nitridu křemíku je dvoufázový materiál (krystalografické modifikace α a β).

Při obrábění šedé litiny s velkým objemem odebíraného materiálu nemá tento druh keramiky konkurenci. Šedou litinu lze obrábět zasucha i při chlazení řeznými rychlostmi až přes 400 m/min. Není vhodné obrábět oceli s malým množstvím legur

z důvodu velkého difuzního opotřebení. Tento řezný materiál se dále používá i na výrobu vysokovýkonných konstrukčních dílů pro motory.

3.1.2.1.3 Keramický kompozit [10]

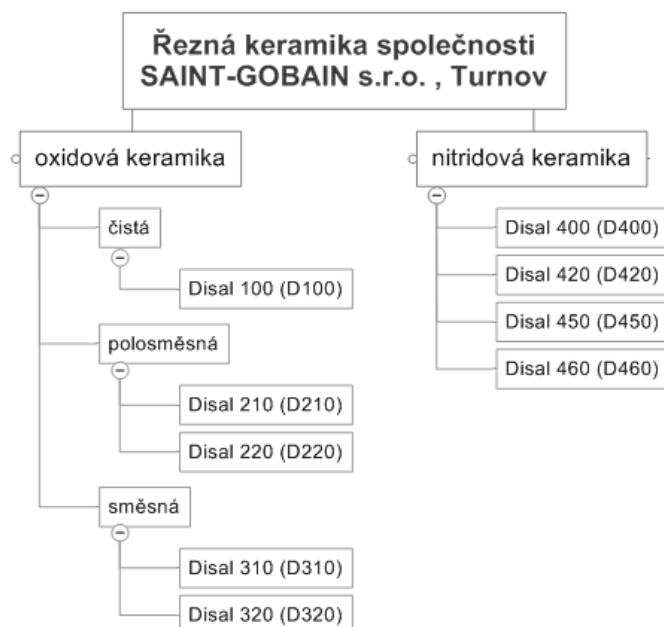
Jedná se o vystuženou keramiku na bázi oxidu hlinitého Al_2O_3 , kdy se do základní matrice (Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiN}$, $\text{Si}_3\text{O}_4\ldots$) přidávají vlákna SiC případně Si_3N_4 (whiskery). Whiskery jsou vlákna krystalu, která mají průměr pouze $1\mu\text{m}$ a délku více než $20\mu\text{m}$. Podíl whiskeru v řezném materiálu činí cca 30%.

Vystužením se zvýší houževnatost, pevnost v tahu, odolnost proti tepelnému šoku, odolnost proti opotřebení (viz Příloha 6.)

Vystužená keramika se pro své specifické vlastnosti používá při obrábění žárovzdorných slitin, kalené oceli a šedé litiny.

3.1.2.2 Rozdělení keramiky společnosti SAINT-GOBAIN, s.r.o. [8]

Některá z měření byla prováděna na keramických destičkách vyrobených společností SAINT-GOBAIN s.r.o., Turnov, která je vyrábí pod obchodním názvem DISAL a patří mezi jedinou společnost v České republice, která se touto výrobou zabývá (viz Obr.3).



Obr.3 : Řezná keramika firmy Saint-Gobain

3.1.2.2.1 Oxidová řezná keramika

3.1.2.2.1.1 DISAL 100 (D100)

Jedná se o čistou oxidovou keramiku na bázi Al_2O_3 , charakteristická svou slonově bílou barvou, která vyniká tvrdostí a odolností proti opotřebení za vysokých řezných teplot (až 1200°C).

Použití nachází při obrábění šedé litiny a konstrukčních ocelí nepřerušovaným řezem, a to s řeznou rychlostí až 1000 m/min.

3.1.2.2.1.2 DISAL 210, 220 (D210, D220)

Jedná se o polosměsnou oxidovou keramiku na bázi Al_2O_3 , ZrO_2 a CoO , charakteristická svou křídově bílou barvou u D210 a modrou barvou u D220, která vyniká stejně jako D100 dobrou tvrdostí a odolností proti opotřebení za vysokých řezných teplot, navíc však má zvýšenou houževnatost, a to především D220 přidáním aditiva CoO , což umožňuje obrábění s mírnějšími rázy.

Použití nachází při obrábění šedé, sférické a temperované litiny. Vhodná je i pro obrábění konstrukčních, zušlechtěných i rychlořezných ocelí lehkým přerušovaným řezem.

3.1.2.2.1.3 DISAL 310, 320 (D310, D320)

Jedná se o směsnou oxidovou keramiku na bázi Al_2O_3 a TiC , která vyniká vysokou tvrdostí a odolností proti teplotním šokům, což umožňuje obrábění s použitím chladicí kapaliny s částečně přerušovaným řezem.

Použití nachází při obrábění tvrzené litiny (do 500 HB) a kalených ocelí (do 64 HRC). Vhodná je i pro střední a jemné frézování.

3.1.2.2.2 Nitridová řezná keramika

3.1.2.2.2.1 DISAL 400, 420, 450, 460 (D400, D420, D450, D460)

Jedná se o nitridovou keramiku na bázi Si_3N_4 , která vyniká vysokou houževnatostí při zachování vysoké tvrdosti. Umožňuje i obrábění běžným přerušovaným řezem a s použitím chladicí kapaliny.

Použití nachází při obrábění všech druhů litin, včetně litiny s kůrou. Je vhodné ji použít i pro hrubování při frézování k dosažení maximálních řezných výkonů.

3.1.3 Vlastnosti řezné keramiky [2], [3]

Vlastnosti keramických řezných materiálů jsou závislé na vlastnostech použitých komponent a na technologii zpracování. Podstatné je zaměřit se na fyzikální, mechanické a řezné vlastnosti těchto materiálů.

V *Příloze 5.* můžeme vidět hodnoty některých fyzikálních veličin různých nástrojových materiálů (slinutý karbid, cermet, oxidová a nitridová keramika) a porovnat tak jejich vlastnosti. V *Příloze 6.* jsou uvedeny hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností whiskerů (keramických kompozitů) pro porovnání s klasickou řeznou keramikou.

3.1.3.1 Struktura

Keramika je polykrystalický materiál elasticky izotropní tvořený zrny malých rozměrů, které se v průběhu slinování částečně spojují s tím, že mezi nimi zůstávají póry, které společně s jednotlivými zrny mají vliv na vlastnosti řezné keramiky, a to s ohledem na jejich velikost, tvar, stejnoměrnost a rozložení.

Hodnocení struktury se provádí velikostí zrn a jejich homogenitou. Největší podíl tvoří zrna velikosti 1 až 3 mm. Velký počet velkých zrn způsobuje snadné opotřebení břitu. Struktura musí být vysoce homogenní.

3.1.3.2 Řezné vlastnosti

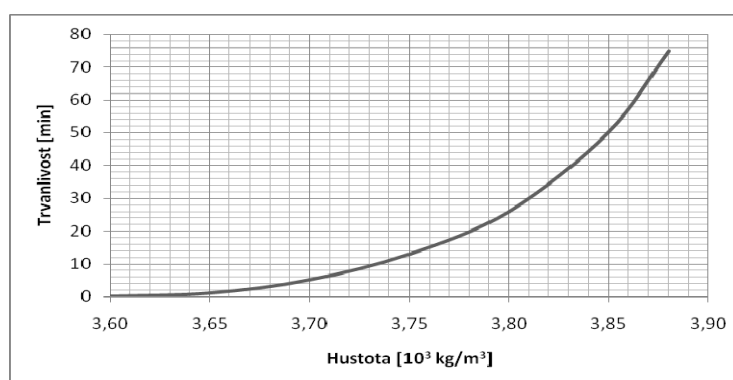
Řezné vlastnosti keramických materiálů závisí především na jejich fyzikálně mechanických vlastnostech, mezi které patří tvrdost, pevnost v ohybu, pevnost v tlaku, odolnost proti opotřebení, velikost zrn atd. Tyto vlastnosti budou dále podrobněji probrány v kapitole „Mechanické a fyzikální vlastnosti“.

Velikosti zrn a rovnoměrnost jejich rozložení zásadním způsobem ovlivňuje všechny mechanické vlastnosti keramických materiálů, a proto má výrazný vliv i na řezivost nástroje.

3.1.3.3 Mechanické a fyzikální vlastnosti

3.1.3.3.1 Hustota

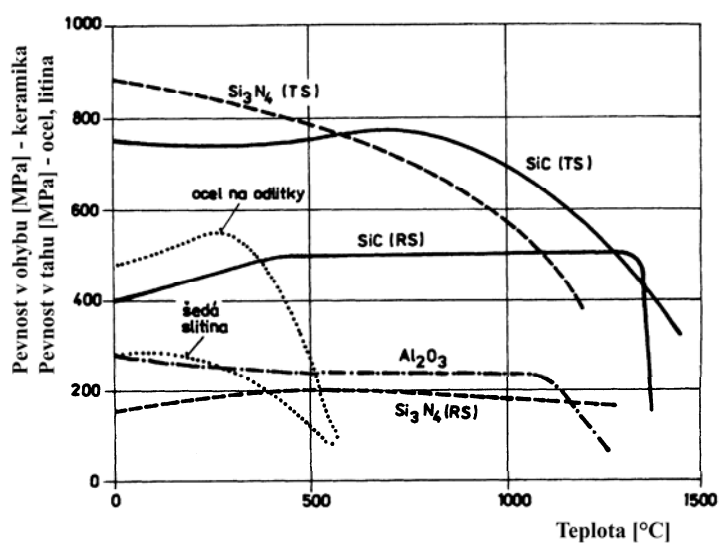
Patří mezi významné fyzikální vlastnosti, protože ovlivňuje řadu dalších vlastností (pevnost v ohybu, trvanlivost, řezivost). Hustota keramických materiálů je minimálně 2x nižší než hustota kovových řezných materiálů. Se zvyšující se hustotou se exponenciálně zvyšuje i trvanlivost řezné keramiky (viz Obr.4).



Obr.4 : Vliv hustoty keramiky na trvanlivost

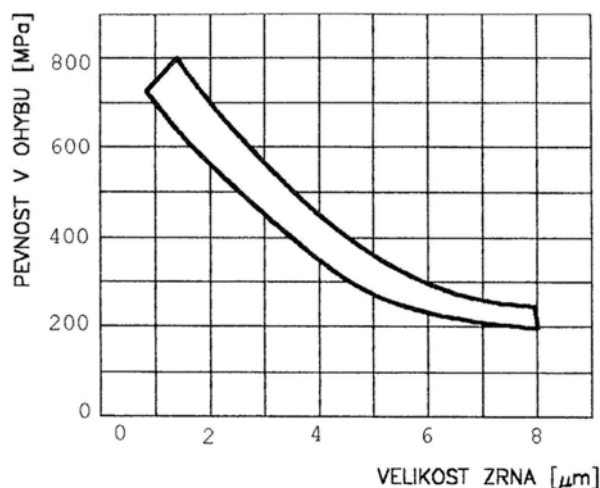
3.1.3.3.2 Pevnost v ohybu, tahu a tlaku

Pevnost v ohybu je oproti slinutým karbidům až 5x nižší. S teplotou se hodnoty pevnosti v ohybu snižují, a to za vyšších teplot mnohem rychleji než za nižších.



Obr.5 : Vliv teploty na pevnost v ohybu [2]

Pevnost v ohybu je mimojiné závislá i na velikosti zrna a to tak, že s rostoucí velikostí zrna se pevnost v ohybu snižuje (viz Obr.6). Proto je potřeba zabránit vytvoření velkých zrn a naopak při výrobě dosáhnout jemnozrnné struktury. Střední velikost zrna bývá do $2\ \mu\text{m}$, což odpovídá pevnosti v ohybu 550 až 800 MPa.



Obr.6 : Vliv velikosti zrna na pevnost v ohybu [12]

Pevnost v tahu u keramických materiálů závisí na velikosti trhlin a pórů, které jsou obtížně kontrolovatelné. U takto křehkých materiálů se proto pevnost v tahu ani neuvádí.

Na **pevnost v tlaku** mají povrchové trhliny menší vliv, proto je tato veličina lépe reprodukovatelná a jen velice málo se mění s teplotou. Hodnoty dosahují poměrně vysokých hodnot (4000 až 5000 MPa).

3.1.3.3 Tvrdost

Tvrdost patří mezi důležité vlastnosti nástrojových materiálů závisící u řezné keramiky na podmínkách zkoušky. Vysoká tvrdost je pozitivem, jelikož způsobuje dobrou odolnost proti opotřebení, což patří mezi hlavní předpoklady dobrého materiálů vhodného pro obrábění. Při zkoušce tvrdosti se vzhledem k nízké plastické deformaci energie přivedená do materiálu uvolňuje vznikem trhlin (rozdíl mezi kovem a keramikou).

Řezná keramika dosahuje vyšších tvrdostí než kovy a všechny přírodní látky. Vyjimku tvoří diamanty, KNB (kubický nitrid boru), které mají tvrdost vyšší. U keramických destiček bývají tvrdosti v rozsahu:

- Podle VICKERSE: 23000 až 24000 – pro čistou keramiku,
- Podle VICKERSE: 28000 až 30000 – pro směsnou keramiku.

Tvrdost je jedna z vlastností, která má vliv na nastavení vyšších řezných rychlostí, což má vliv na vyšší výkony při obrábění.

3.1.3.3.4 Lomová houževnatost

Lomová houževnatost patří mezi určující hodnoty keramických materiálů. Lom je možno charakterizovat jako dělení tělesa na dvě nebo více částí šířící se vždy z určitého místa (trhliny). Keramika obsahuje především po hranicích zrn velké množství mikrotrhlin vznikajících při procesu slinování a ochlazování ze slinovací teploty. Vznik mikrotrhlin může navíc zapříčinit i malá plastická deformace po hranicích i uvnitř zrn. Nukleaci trhlin však není možné zabránit. Šíření trhlin ze zárodečných mikrotrhlin, které vzniká porušováním meziatomových vazeb na čele trhliny vysokou koncentrací tahových napětí, rozhoduje o lomu materiálu.

Lomová houževnatost je vyjádřena kritickým faktorem intenzity napětí K_{IC} vyplývajícího z lomové mechaniky. Čím je hodnota K_{IC} vyšší, tím pomalejší je šíření trhliny. Hodnoty tohoto faktoru pro jednotlivé materiály bývají:

- Oxidová keramika - $K_{IC} = 4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,
- Směsná keramika - $K_{IC} = 4 \text{ až } 5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,
- Nitridová keramika - $K_{IC} = 6 \text{ až } 9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,
- Slinutý karbid (94%WC + 6%Co) - $K_{IC} = 11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,
- Konstrukční ocel - $K_{IC} = 30 \text{ až } 140 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Z výše uvedených hodnot a poznatků vyplývá, že u oceli se trhliny šíří nejpomaleji z uvedených řezných materiálů a naopak u řezné keramiky se trhliny šíří velmi rychle.

3.1.3.3.5 Žáruvzdornost

Žáruvzdornost je charakterizována jako odolnost proti tepelnému namáhání (tepelným šokům). Tuto vlastnost mají keramické materiály velmi dobrou.

3.1.3.3.6 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost řezné keramiky je v porovnání s jinými materiály několikanásobně menší. Pro příklad, keramický materiál na bázi Al_2O_3 má asi 10x nižší tepelnou vodivost než rychlořezná ocel a (13 až 40)x nižší než slinuté karbidy, což způsobuje výrazné zahřívání řezného hrotu keramické destičky. [1]

Tepelná vodivost je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti λ , který udává jak dobrým nebo špatným tepelným izolantem je daný materiál. Pro názornost uvádím hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro různé druhy materiálů sestupně od nejvyšších hodnot λ (viz Tab.1): [3]

Látka	λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
Diamant	895 až 2300
Stříbro	429
Měď	386
Zlato	317
Hliník	237
Železo	80,2
Platina	71,6
Olovo	35,3
Řezná keramika	21 až 38

Tab.1 : Hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro vybrané materiály [3]

3.1.3.3.7 Teplotní délková roztažnost [3]

Jedná se o jev, při kterém se těleso zahřáté o určitou teplotu roztáhne o určitou délku. Tento jev je charakterizovaný součinitelem dékové teplotní roztažnosti α . Hodnota tohoto součinitele závisí nejen na druhu látky, ale také na teplotě.

Řezná keramika má teplotní délkovou roztažnost řádově stejnou jako kovové materiály a její rozsah se při teplotách 0 až 1000 °C pohybuje v rozmezí 7,8 až 8,5 K⁻¹.

3.1.3.3.8 Odolnost proti tepelným rázům

Jedná se jednu z vlastností ovlivňující použití keramických materiálů. Tepelné rázy vedou ke vzniku napětí v keramické destičce, což má za následek výskyt trhlinek, které vedou až k samotné destrukci destičky. Tyto rázy mohou nastat při prudkém zahřátí najetím nebo vyjetím z řezu. Tato skutečnost omezuje možnost použití řezných kapalin pro keramické materiály.

Odolnost proti tepelným rázům lze vyjádřit vztahem (1):

$$Q_r = \frac{\lambda \cdot R_m}{\alpha \cdot E} [kW / m] \quad (1)$$

kde:

λ [W.m⁻¹.K⁻¹]...měrná tepelná vodivost,

R_m [MPa]...pevnost v tahu,

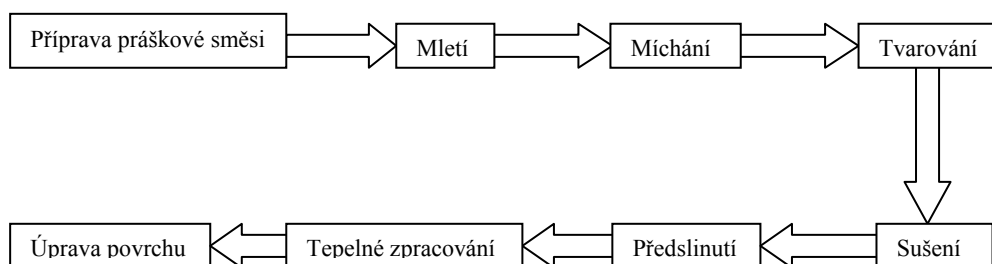
α [K⁻¹]...součinitel dékové roztažnosti,

E [MPa]...modul pružnosti v tahu.

3.1.4 Výroba keramických řezných destiček

3.1.4.1 Základní informace o procesu výroby

Technologie výroby keramických břitových destiček je podobná technologii výrobě destiček ze slinutých karbidů s tím rozdílem, že keramické destičky neobsahují žádný materiál, který by spojil zrna tvrdé fáze do jednoho tělesa. Tento fakt zvyšuje nároky na výrobní zařízení a celkově znesnadňuje výrobu destiček. Proces výroby probíhá podle Obr.7 . [5]



Obr.7 : Schéma procesu výroby keramických břitových destiček

Výchozími materiály pro výrobu řezné keramiky jsou oxidy (Al_2O_3 , Y_2O_3 , ZrO_2), karbidy (TiC , TiN) a nitrid (Si_3N_4). Pro názornost uvádím hodnoty teplot tavení a tvrdostí pro tyto jednotlivé složky (viz Tab.2). [4]

Materiál	Tvrdost [HV]	Teplota tavení [°C]
Al_2O_3	2000	2050
ZrO_2	-	2700
Si_3N_4	1000	1900
SiC	2500	2200

Tab.2 : Hodnoty teplot tavení a tvrdostí pro výchozí materiály řezné keramiky [12]

3.1.4.2 Výroba destiček z oxidové keramiky [2]

Základní surovinou pro výrobu tohoto typu keramiky je velmi čistý a jemnozrnný oxid hlinitý – Al_2O_3 . K němu se po vstupní kontrole přidávají malá množství pomocných látek, které mají usnadnit slinování a zabránit růstu zrna (různí výrobci k tomuto účelu užívají různé materiály, nejčastěji se jedná např. o oxidy zirkónia, yttria, chromu, titanu, niklu, hořčíku, kobaltu a molybdenu a karbidy těžkovitelných kovů jako je wolfram a titan). Po mokřém semletí se tato směs rozprašováním vysuší, čímž získá prášek schopný soudržnosti, který je lisován na automatických lisech do požadovaného tvaru. Lisování probíhá obvykle na lisech s oboustranným tlakem, aby bylo zajištěno dobré zhuštění polotovaru v celém průřezu.

Další z možností výroby keramických destiček je izostatickým lisováním, vstřikovacím lisováním a litím.

Po vylisování následuje slinování ve speciálních pecích, kde dochází ke spojení prášku do tuhého tělesa potřebného tvaru. Poté následuje broušení na konečné rozměry a požadované kvality povrchu. [2]

3.1.4.3 Výroba destiček z nitridové keramiky [2], [6]

Slinování Si_3N_4 při atmosférickém tlaku je mnohem obtížnější než u oxidových keramik, a to v důsledku jeho nižší samodifúze a teploty rozkladu. Proto je při výrobě nutné dopovat výchozí prášek slinovacími přísadami a aplikovat technologický postup vysokoteplotního izostatického lisování (HIP). Slinovací aditiva vytvoří s nitridem křemíku během ohřevu tekutou fázi, která podporuje zhutňovací proces.

Dalším problémem při slinování nitridu křemíku způsobuje pevná kovalentní vazba mezi atomy křemíku a dusíku, která omezuje možnost samodifúze a tím zabraňuje dosažení teoretické hustoty materiálu.

Pro břitové destičky řezných nástrojů jsou nejčastěji užívané materiály:

- Reakčně vázaný nitrid křemíku,
- Slinutý nitrid křemíku,
- Nitrid křemíku lisovaný za vysokých teplot,
- Nitrid křemíku vyrobený metodou HIP.

3.1.5 Užití řezné keramiky v procesech obrábění [2], [6]

3.1.5.1 Soustružení

3.1.5.1.1 Základní směrnice pro soustružení keramikou

Řezná keramika patří mezi velmi výkonné nástrojové materiály. Její nasazení ve strojírenské výrobě vyžaduje dodržet určité zásady pro její efektivní využití, mezi které u soustružení patří především:

- Vysoká tuhost systému STROJ-NÁSTROJ-OBROBEK (kmitání jakéhokoli druhu výrazně zvyšuje intenzitu opotřebení nástroje).

- Použití výkonných obráběcích strojů s širokým rozsahem posuvů a otáček (výhodná je zejména možnost jejich plynulé změny) a možností nastavení vysokých řezných rychlostí.
- Zabezpečení pevného a spolehlivého upnutí obrobku (zejména při soustružení větších součástí při vysokých otáčkách, kdy proti upinacím silám působí velké odstředivé síly).
- Odstranění kůry obráběného polotovaru (zejména u odlitků, výkovků, ale i válcovaného materiálu) např. slinutým karbidem, který má vyšší odolnost proti abraznímu mechanismu opotřebení, které převládá při obrábění kůry.
- Výběr vhodného tvaru a velikosti břitové destičky.
- Správná volba tvaru ostří břitové destičky (velikost a sklon negativní fazetky na čele).
- Před začátkem obrábění se doporučuje srazit hrany.
- Pro hrubování zvolit vyměnitelnou břitovou destičku kruhového tvaru, nebo malý úhel nastavení hlavního ostří.
- Při soustružení načisto a při kopírovacím soustružení se používají převážně vyměnitelné břitové destičky typu C a D. Také výroba zápichů, zvláště v šedé litině, se s úspěchem provádí řeznou keramikou.
- Zásadně je nutné dát přednost obrábění zasucha. Tím také odpadá nutnost řešit problémy s likvidací chladicí kapaliny.

3.1.5.1.2 Volba základních parametrů při soustružení

Průřez třísky lze pro podélné soustružení vyjádřit vztahem:

$$S = a \cdot b = a_p \cdot f [mm^2] \quad (2)$$

kde:

a [mm]...tloušťka třísky,

b [mm]...šířka třísky,

a_p [mm]...hloubka řezu,

f [mm]...posuv na otáčku.

Při obrábění tvrdých materiálů (kalená ocel, tvrzená litina) keramickými destičkami je třeba volit relativně nízké hodnoty tloušťky třísky a , neboť dochází k poměrně

velkému zatížení břitu. Aby přitom nedošlo k přílišnému snížení úběru materiálu, je třeba v souladu se vztahem (2), současně nastavit větší šířku třísky b . K tomuto cíli vedou 2 cesty. Buď zvětšením hloubky řezu a_p (což není při obrábění tvrdých materiálů reálné) nebo zmenšením úhlu pracovního nastavení ostří κ_{re} . Zmenšení tohoto úhlu umožňuje též zvýšit posuv na otáčku při zachování konstantní tloušťky třísky, protože vzájemná závislost těchto 3 parametrů je vyjádřena vztahem:

$$s = \frac{a}{\sin \kappa_{re}} [mm] \quad (3)$$

3.1.5.1.3 Volba tvaru destičky při soustružení keramikou

Všude, kde je to jen trochu možné, by se všeobecně měla dávat při použití nástrojů z řezné keramiky přednost vyměnitelným břitovým destičkám kruhového tvaru. Tyto destičky mají stabilní břit a malý úhel nastavení hlavního ostří. Aby se minimalizovalo nebezpečí opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě, je nutné také u kruhových vyměnitelných břitových destiček pečlivě dbát na poměr hloubky řezu k průměru břitové destičky. Tento poměr by měl být 1/7. Je-li obráběná plocha předhrubována, může být uvedená hodnota zvýšena na 1/4.

3.1.5.2 Frézování

V počátečním období vývoje řezných keramik byly tyto materiály doporučovány výhradně pro obráběcí operace s nepřerušovaným řezem, tedy hlavně pro soustružení. Keramické břitové destičky dosahovaly nižších hodnot mechanických vlastností a nesnášely náhlé změny mechanického ani tepelného namáhání. Postupným vývojem však byly všechny vlastnosti keramik zlepšovány do té míry, že je dnes většina výrobců doporučuje též pro obráběcí operace s přerušovaným řezem, včetně frézování. [6]

3.2 Teoretická studie slinutých karbidů (SK)

3.2.1 Úvod

Tato práce je zaměřena především na experimenty s řeznou keramikou. Co se týče slinutých karbidů, má za úkol pouze porovnat výsledky ze syntézy naměřených hodnot s výsledky keramiky při obrábění šedé litiny. Proto teoretická část bude zestručněna jen na nejdůležitější poznatky těchto materiálů.

Další poznatky o slinutých karbidech, jako jejich výrobě, podrobnějších vlastnostech, je možno najít v publikaci [15].

3.2.2 Charakteristika SK [7]

Slinuté karbidy jsou v současné době nejpoužívanějším řezným materiálem pro obrábění kovů a jak už sám název říká, je slinutý karbid produkt práškové metalurgie obsahující tvrdé částice karbidu, které jsou vázány kovovým pojivem.

Jedná se zde o výhodnou kombinaci vlastností a společně s rychlořeznou ocelí hraje tento materiál při obrábění kovů vedoucí roli, speciálně při vyšších řezných rychlostech.

3.2.3 Rozdělení a charakteristika skupin SK [2]

Vzhledem ke svému složení jsou běžné nepovlakované SK někdy též označovány jako jednokarbidové (K), dvoukarbidové (P) a vícekarbidové (M):

- 1) Skupina K: WC + Co + (TaC.NbC)
- 2) Skupina P: WC + TiC + Co + (TaC.NbC)
- 3) Skupina M: WC + TiC + TaC.NbC + Co

3.2.3.1 Nepovlakované SK

Nepovlakované slinuté karbidy jsou v současné době vhodné pro obrábění hliníku, pro zvláštní účely a k řešení specifických problémů.

3.2.3.1.1 Skupina K

Skupina K je určena pro obrábění materiálů, které vytvářejí krátkou, drobivou třísku (zejména pro litiny, neželezné slitiny a nekovové materiály). Řezné síly jsou přitom obvykle relativně nízké a převládá abrazní a adhézní opotřebení.

Karbid wolframu WC tvoří jedinou tvrdou strukturní složku této skupiny a má za pokojové teploty zhruba stejnou tvrdost jako TiC. S rostoucí teplotou však ztrácí tvrdost rychleji než TiC, a proto není vhodné používat SK této skupiny pro obrábění materiálů tvořících dlouhou třísku, která tepelně zatěžuje čelo nástroje.

3.2.3.1.2 Skupina P

Tato skupina je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku, jako jsou uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické nerezavějící oceli. Řezný proces je obvykle doprovázen velkými řeznými silami a značným opotřebením na čele.

Přířada TiC zaručuje vyšší tvrdosti a vysokou odolnost proti difúzi za vysokých teplot, která je jednou z hlavních příčin vytváření výmolů na čele nástroje v místě styku s odcházející třískou. Nevýhodnou vlastností TiC v porovnání s WC je její vyšší křehkost a nižší odolnost proti abrazi.

3.2.3.1.3 Skupina M

Tato skupina má univerzální použití a je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou a střední třísku, jako jsou lité oceli, austenitické nerezavějící oceli a tvárné litiny. Vzhledem k relativně vysoké houževnatosti se používají pro těžké hrubovací a přerušované řezy.

3.2.3.2 Povlakované SK

Tyto karbidy jsou opatřeny velmi tenkým povlakem z tvrdého materiálu. Tento povlak měl sice tloušťku jen několik mm, ale zvýšil velmi drasticky ze dne na den výkonnost nástrojů ze SK. Podstatně se tím zvýšila řezná rychlost a trvanlivost břitů.

V dnešní době jsou téměř všechny základní druhy SK pro soustružení opatřeny povlakem. Nejdůležitější materiály pro povlakování jsou: karbid titanu (TiC), nitrid titanu (TiN), oxid hlinitý (Al_2O_3) a karbonitrid titanu (TiCN).

3.2.4 Charakteristické vlastnosti SK [7]

I přesto, že s rostoucí teplotou klesá tvrdost a pevnost v tlaku, zachovává si SK vynikající odolnost proti opotřebení i při vysokých řezných rychlostech. Tepelná odolnost tohoto materiálu je vysoká a s použitím vhodného povlaku je rovněž vysoká i odolnost proti oxidačnímu opotřebení.

Při porovnání s ocelí je slinutý karbid podstatně tvrdší a má mnohem vyšší pevnost v tlaku, je ovšem citlivější na namáhání tahem. Jeho hustota činí přibližně dvojnásobek hustoty oceli, což se samozřejmě nevztahuje na druhy zhotovené na bázi titanu (cermety), které jsou lehčí. Modul pružnosti je dva- až třikrát vyšší než u oceli.

3.3 Studie břitu řezného nástroje

3.3.1 Trvanlivost řezných nástrojů [11]

Trvanlivost a životnost břitu nástroje se nejčastěji vyjadřuje jako čas řezného procesu vyjádřený v minutách nebo jako dráha řezu vyjádřená v metrech. Pro vrtání, vyhrubování a vystružování děr se trvanlivost nástroje často vyjadřuje jako délka obrobené díry v metrech.

Trvanlivost břitu T je obecně závislá na řezných podmínkách. Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti se pro jinak konstatní podmínky popisuje jednoduchých Taylorovým vztahem ve tvaru:

$$T = f(vc) = \frac{C_T}{v_c^m} [\text{min}] \quad (4)$$

kde:

C_T [mm]...konstanta,

m [mm]...exponent,

v_c [mm]...řezná rychlost.

f [mm]...posuv na otáčku.

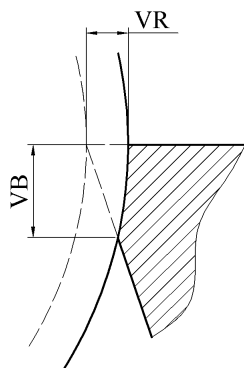
3.3.1.1 Kriteria otupení nástroje

Otupení nástroje, které slouží ke stanovení hodnoty trvanlivosti pro jednotlivé případy obrábění, posuzujeme podle velikosti otupení břitu. Hodnotu opotřebení, při kterém považujeme nástroj za otupený, nazýváme *kriterium otupení*. Tato přípustná míra není hodnota stálá, ale závisí na druhu práce (hrubování, práce na čisto), způsobu obrábění (soustružení, frézování, vrtání, apod.), druhu řezného a obráběného materiálu, na řezném prostředí, atd.

Stav otupení břitu můžeme hodnotit z hlediska technologického, nebo ekonomického.

Z technologického hlediska považujeme břit za otupený, není-li již nástroj schopen obrábět danou plochu v požadované jakosti. Toto hledisko se uplatňuje především při dokončovacích operacích, jako je jemné soustružení, vyvrtávání, protahování, vystružování, apod. Kritériem otupení je zde buď velikost tzv. radiálního otupení VR , nebo takový stav porušení ostří, že jím nelze dosáhnout požadované

drsnosti obrobené plochy. Radiální opotřebení je přímo závislé na velikosti opotřebení hřbetu nástroje VB (viz Obr.8).



Obr.8 : Závislost radiálního otupení na opotřebení hřbetu nástroje [12]

Ekonomické hledisko opotřebení nástroje vychází z požadavku hospodárnosti procesu obrábění. Z tohoto hlediska se jako optimální otupení břitu volí největší přípustný otěr jeho břitu a čela, při němž je nástroj ještě schopen pracovat. Se zvyšováním míry otupení se snižují náklady strojní práce N_s , neboť při konstantní trvanlivosti je možno pracovat vyšší řeznou rychlostí.

Při překročení maximální přípustné velikosti otěru na hřbetě by došlo v krátké době k lavinovitému otěru a k absolutní pracovní neschopnosti nástroje.

Optimální hodnoty opotřebení se mění se změnou řezných podmínek (např. klesají s rostoucí řeznou rychlostí). Obdobně dochází ke snížení optimálního opotřebení s rostoucí křehkostí nástrojového materiálu a naopak ke zvýšení optimálního opotřebení s rostoucí křehkostí materiálu obráběného. Je to způsobeno tím, že závislost řezných odporů i teploty na změně opotřebení je u těchto materiálů výrazně nižší, než u houževnatých materiálů.

U keramických materiálů se optimální hodnota opotřebení pohybuje obvykle v rozsahu 0,3 až 0,6 mm.

3.3.1.2 Závislost trvanlivosti břítu na řezných podmínkách

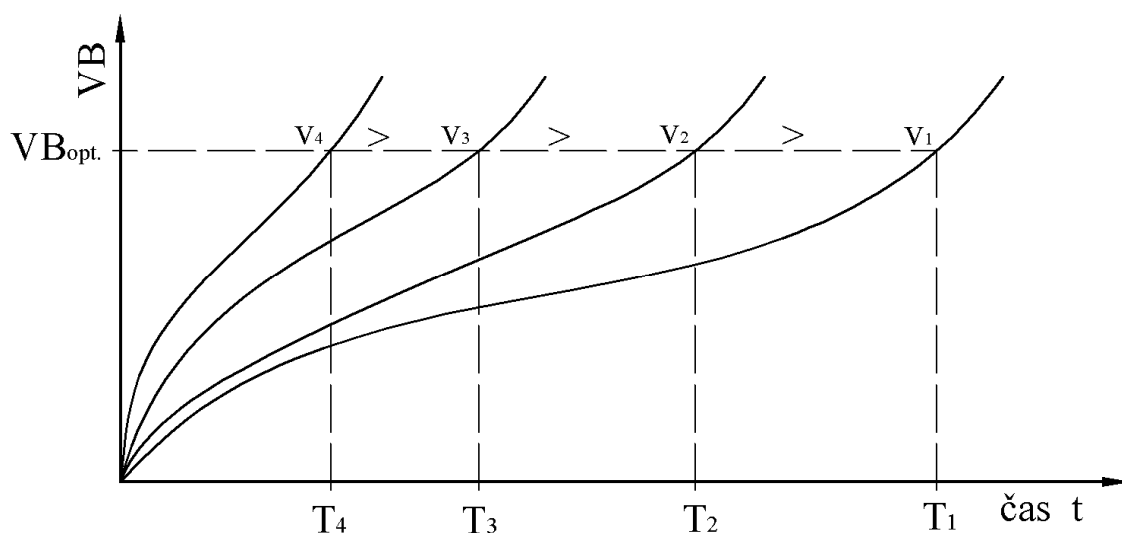
Trvanlivost břítu nástroje je v případě konstantních pracovních podmínek závislá na třech fyzikálních parametrech:

- 1) řezné rychlosti v_c
- 2) hloubce řezu a_p
- 3) posuvu f

Závislost trvanlivosti ostří na jednotlivých fyzikálních parametrech lze graficky znázornit v logaritmických souřadnicích. Vliv řezných podmínek na trvanlivost ostří je v obecném poměru jejich vlivu na intenzitu otěru.

Z výše uvedených řezných podmínek ovlivňuje intenzitu otupení a tím i trvanlivost břítu T nejvíce řezná rychlost v_c . Tuto závislost je možno stanovit experimentálně.

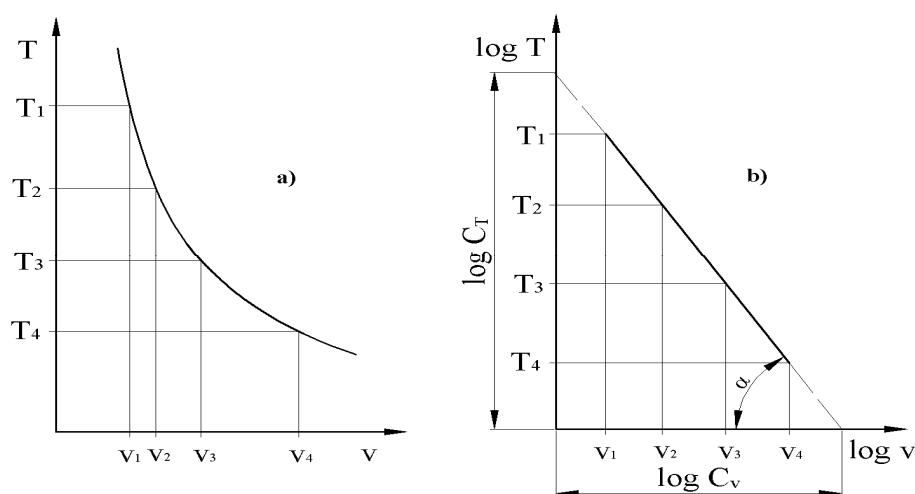
Obrábíme-li určitý materiál několika řeznými rychlostmi při konstantních řezných podmínkách a vynášíme-li průběh otupení břítu do diagramu $VB=f(t)$, získáme charakteristické křivky otupení pro jednotlivé řezné rychlosti v_c , z nichž pro zvolené kritériální opotřebení VB_K odpovídající trvanlivost T (viz Obr.9).



Obr.9 : Závislosti charakteristických křivek otupení [6]

Vynesením hodnot řezných rychlostí a jim odpovídajících trvanlivostí do diagramu $T=f(v_c)$ získáme grafické vyjádření závislosti trvanlivosti nástroje na řezné rychlosti. V kartézských souřadnicích má tato závislost tvar exponenciální křivky, v logaritmických souřadnicích je zobrazena jako přímka, jejíž rovnice je dána výrazem:

$$\log T = \log C_T - m \cdot \log v_c \quad (5)$$



Obr.10 : Závislost trvanlivostí na řezných rychlostech [6]

Odlogaritmováním vztahu (5) získáme **Taylorův vztah**:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \text{ [min]}, \text{ nebo } v_c = \frac{C_v}{T^{\frac{1}{m}}} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (6)$$

Ten je matematickým vyjádřením závislosti $T=f(v_c)$. Hodnota exponentu m je určena směrnici přímky $m = \tan \alpha_v$. Hodnotu konstant C_T a C_v je možno také určit z diagramu (viz Obr.10b) jako úseky na osách $\log T$ a $\log v$, kde pro podmínky $v=1$ je $T=C_T$ a pro $T=1$ je $v=C_v$.

Vztah (6) vyjadřuje vliv určitých faktorů na efektivnost daného případu obrábění. Velikost konstant C_T a C_v určuje polohu křivky závislosti $T=f(v_c)$ a jejich zvětšení má za následek posunutí křivky směrem k vyšším hodnotám řezných rychlostí. Exponent m , který odpovídá směrnici křivky $T=f(v_c)$ určuje vliv změny řezné rychlosti na změnu

trvanlivosti. V podstatě vyjadřuje, s jakou citlivostí reaguje nástroj z hlediska intenzity otěru na změnu řezné rychlosti. V případě nízkých exponentů m je nástroj méně citlivý na změnu řezné rychlosti, než je tomu u vyšších exponentů.

Velikost hodnot konstant C_T , C_v a exponentu m , stanovených pro určitý případ obrábění, platí pouze v určitém rozsahu řezných podmínek. Tento rozsah je různý podle druhu obráběného materiálu.

Hodnoty C_T , C_v a m závisí především na materiálu bříty nástroje, dále pak na materiálu obrobku, v menší míře na posuvu a hloubce řezu, na geometrii bříty a na řezném prostředí.

Velikost exponentu m pro běžné nástrojové materiály za běžných podmínek se pohybuje v rozsahu (viz Tab.3):

Exponent m	nástrojový materiál
8 - 12	nástrojové oceli
5 - 8	rychlořezné oceli
2,5 - 5	slinuté karbidy
1,2 - 2,5	keramické materiály

Tab.3 : Hodnoty exponentu m za běžných podmínek [6]

Hodnoty konstant C_T se řádově pohybují v rozsahu 10^3 až 10^6 a konstant C_v v rozsahu 10^1 až 10^3 . [5]

Vliv hloubky řezu a_p a posuvu f na trvanlivost bříty se určuje nepřímo prostřednictvím vlivu těchto parametrů na řeznou rychlost v_T (řezná rychlost odpovídající určité trvanlivosti bříty T).

Platí Taylorův vztah:

$$v_T = \frac{C_{v_T}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \left[\text{m} \cdot \text{min}^{-1} \right] \quad (7)$$

Míra vlivu hloubky řezu a_p a posuvu f je zde dána hodnotami exponentů x_v , resp. y_v .

Po zahrnutí vlivu řezné rychlosti, posuvu a hloubky řezu získáme tzv. **komplexní Taylorův vztah**:

$$v_c = \frac{C'_v}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot T^{\frac{1}{m}}} \left[\text{m} \cdot \text{min}^{-1} \right] \quad (8)$$

3.3.1.3 Vliv geometrie nástroje na trvanlivost břitu

Geometrie nástroje s břitovou destičkou je tvořena z několika částí: geometrický tvar břitové destičky, provedení břitu, geometrie uložení břitové destičky v těle nástroje. Z fyzikálních vlastností řezných materiálů vyplývají faktory pro vytvoření řezného klínu. Oxidová a směsná keramika vykazují vysokou odolnost proti tlaku a opotřebení, ale menší pevnost v ohybu. Z toho vyplývá požadavek na stabilní ostří a geometrii, která zajišťuje zatížení destičky převážně na tlak a méně na ohyb. Těchto požadavků dosáhneme: co možná největším úhlem špičky, úhlem nastavení 90°, většími rádiusy špičky (1 až 2 mm), negativním úhlem čela a úhlem sklonu ostří.

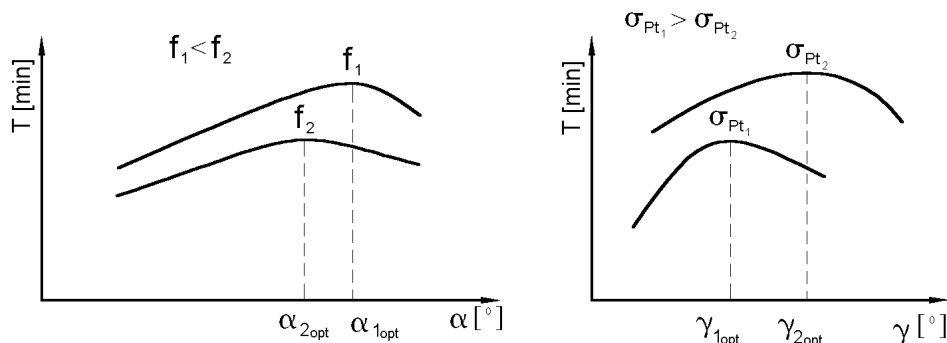
Často se vytváří fasetka na břitu z důvodu zvýšení pevnosti břitu, neboť fasetka tak vstupuje do řezu dříve, než skutečný úhel čela. Zároveň dochází ke zvýšení spolehlivosti břitu.

Materiál řezného nástroje	Úhel čela	Úhel hřbetu	Úhel sklonu břitu	Úhel nastavení břitu	Úhel špičky
Rychlořezná ocel	25	8	0	75	90
Slinutý karbid	+ 6	5	0	75	90
	- 6	6	- 6	75	90
Keramika	- 6	6	- 6	75	90

Tab.4 : Standardní hodnoty úhlů při soustružení [12]

Úhel hřbetu α je obecně kolem 6°. Menší úhly vedou k odtlačování nástroje. U nástrojů s břitovými destičkami je úhel hřbetu funkcí úhlu uložení (úhel čela, úhel sklonu) v držáku. Má vliv na tření mezi hřbetní plochou a obráběným materiálem.

Zvětšováním úhlu hřbetu roste trvanlivost až do určité hodnoty α_{opt} (viz Obr.11a), po níž následuje pokles způsobený snížením mechanické pevnosti řezného klínu. Na α_{opt} má největší vliv velikost posuvu.



Obr.11 : a) Vliv úhlu hřbetu, b) Vliv úhlu čela na trvanlivosti [12]

Úhel břitu β bývá obvykle 90° . Menší úhly zeslabují břit a používají se jen pro soustružení na čisto a pro dokončovací soustružení.

Úhel čela γ je výhodné používat pro řeznou keramiku negativní. Při obrábění zachycuje převážně tlakové a méně ohybové zatížení. Díky odolnosti řezné keramiky proti opotřebení nevznikají tímto žádné nevýhody ohledně trvanlivosti břitu. Ovlivňuje plastické deformace i tření. S rostoucím úhlem čela vzrůstá trvanlivost až do γ_{opt} (viz Obr.11b), pak následuje snížení pevnosti břitu, jehož důsledkem je mechanické porušení břitu. Největší vliv na γ_{opt} mají mechanické vlastnosti obráběného materiálu.

Mezi úhlem hřbetu α , úhlem břitu β a úhlem čela γ platí vztah:

$$\alpha_o + \beta_o + \gamma_o = 90^\circ \Rightarrow \gamma_o = 90^\circ - (\alpha_o + \beta_o) \quad (9)$$

z něhož plyne pro úhel hřbetu $\alpha_o = 6^\circ$ a úhel břitu $\beta_o = 90^\circ$, úhel čela $\gamma_o = -6^\circ$.

Úhel sklonu ostří λ_s je negativní, aby ohybové zatížení řezného klínu bylo co nejmenší. Pro úhly špičky mezi 60° a 90° jsou zvoleny úhly sklonu ostří od 4° do 6° . Úhel sklonu ostří vyplývá z úhlu uložení břitové destičky v držáku a ovlivňuje trvanlivost především při přerušovaném řezu, kdy je třeba, aby ostří vnikalo do ubírané vrstvy postupně, počínajíc body, které jsou od špičky nejvíce vzdáleny. Toho se docílí záporným úhlem sklonu ostří.

Úhel špičky ϵ_r ve velké míře ovlivňuje stabilitu špičky. Pro soustružení se používá nejčastěji úhel špičky 90° a větší. Pro obrobky s pravoúhlými tvary používáme kosočtvercové destičky s úhlem špičky 80° . Pro kopírovací soustružení volíme úhel špičky 55° .

Poloměr špičky r_ϵ je součástí geometrického tvaru břitové destičky. Pro řeznou keramiku je výhodnější volit větší poloměry špičky. Jako běžné velikosti se vyrábějí rádiusy 1,2 nebo 1,6 mm. Menší poloměry se doporučují jen pro dokončovací operace. Větší poloměry jsou výhodné z hlediska vyšší tuhosti, ale zvyšují pasivní síly. Proto je jejich použití omezeno na stroje s příslušnou tuhostí. Má vliv na zlepšení podmínek odvodu tepla z místa řezu. S rostoucím poloměrem špičky roste též trvanlivost.

Úhel nastavení κ_r fixuje polohu hlavního ostří ke směru posuvu. Se zvolenými hodnotami pro hloubku řezu a posuv určuje zároveň šířku a tloušťku třísky. Čím je úhel nastavení menší, tím se zmenšuje při daném posuvu tloušťka třísky a specifické zatížení břitu. Šířka třísky je však větší (viz *Obr.11*). Nejvhodnější úhel nastavení pro normální soustružení je 75° . Při hrubování se doporučuje úhel $\kappa_r=45^\circ$. Úhel nastavení 90° by se měl používat jen tehdy, když to profil obrobku naléhavě předepisuje, protože přináší největší zatížení břitu. Působí na trvanlivost nástroje v souvislosti s jeho vlivem na teplotu řezání. Se zvětšením úhlu nastavení je snížen odvod tepla a tedy roste teplota v místě řezu. To má za následek zvýšení intenzity opotřebení a tedy nižší trvanlivost.

3.3.1.4 Zkoušky trvanlivosti

3.3.1.4.1 Krátkodobé zkoušky trvanlivosti

Cílem krátkodobých zkoušek trvanlivosti je snížení časové a materiálové náročnosti dlouhodobých zkoušek i za cenu snížení přesnosti. To má především velký význam při použití řezných materiálů ze slinutých karbidů a řezné keramiky.

Zkracování zkoušek trvanlivosti se dosahuje např. zvýšením řezných podmínek, snížením míry otupení a_H apod. V případě určování závislosti $T=f(v)$ krátkodobou zkouškou se zvýšenými řeznými rychlostmi jsou získané výsledky odlišné od výsledků získaných dlouhodobou zkouškou. Proto tato zkouška je vhodná v případě, že nelze užít

objektivnější zkoušky, případně tam, kde se jedná o vzájemné porovnání T - v závislosti, za stejných zaostřených podmínek.

Existuje celá řada krátkodobých zkoušek trvanlivosti z nichž každá je vhodná pro různé podmínky a druhy obrábění:

- 1) Podle Andonnova
- 2) Podle Bezpozvaného
- 3) Podle Kondratova
- 4) Čelní zkouška podle Vandoogena
- 5) Zkouška podélným soustružením s konst. posuvovou silou
- 6) Zkouška vrtání s konst. posuvovou silou
- 7) Zkouška řezivosti VŠST
- 8) Mikrozkouška VÚOSO
- 9) Zkouška při podélném soustružení se sníženou mírou otupení

3.3.1.4.2 Dlouhodobé zkoušky trvanlivosti

Snahou je tyto zkoušky minimalizovat z důvodu časové a materiálové náročnosti. Tyto zkoušky jsou však přesnější a přibližují se skutečnosti více než zkoušky krátkodobé.

Dlouhodobá zkouška musí být naměřena na soustruhu s plynulým přechodem otáček a je daná mezinárodní normou ISO 3685-E-77-05-15.

Řezná rychlost v_c [m/min] se stanovuje podle geometrické řady volitelných čísel R 40 (obrábění nástroji z rychlořezných ocelí), R 20 (obrábění slinutými karbidy), R 10 (obrábění řeznou keramikou). Řezné rychlosti se musí stanovit tak, aby při maximální řezné rychlosti nebyla naměřená trvanlivost nástroje menší než 5 minut.

Při provádění zkoušek se doporučuje použít soustruh vybavený zařízením na plynulou změnu otáček, umožňující zachovávat v průběhu zkoušky konstantní řeznou rychlost při proměnném průřezu obrobku. Pokud takový stroj není k dispozici, užívá se více obrobků stejného průměru, nebo se změna řezné rychlosti udržuje v co nejužším intervalu a nakonec se ke zjištěné trvanlivosti vypočte průměrná řezná rychlost. Chyba takového měření nepřekračuje hodnotu v praxi přípustnou.

Při dlouhodobých zkouškách trvanlivosti je experimentální postup následující:

1. Zkouškami zjistíme časový průběh opotřebení nástroje (křivky opotřebení) pro několik hodnot konstantních řezných rychlostí při konstantních ostatních řezných podmínkách.
2. Stanovíme kritérium otupení VB_k a z křivek opotřebení odečítáme hodnoty trvanlivostí příslušejících jednotlivým řezným rychlostem.
3. V logaritmických souřadnicích sestrojíme graf závislosti $T-v_c$ ze stanovených hodnot.
4. Matematicky vyhodnotíme závislost a stanovíme příslušné konstanty C_T , C_v a exponent m .

Pro zajištění přesných výsledků je nutné celý postup několikrát opakovat, čímž je částečně vyloučen vliv nepředvídatelných náhodných jevů, které zvyšují rozptyl naměřených hodnot trvanlivosti.

3.3.2 Opotřebení břitu řezného nástroje

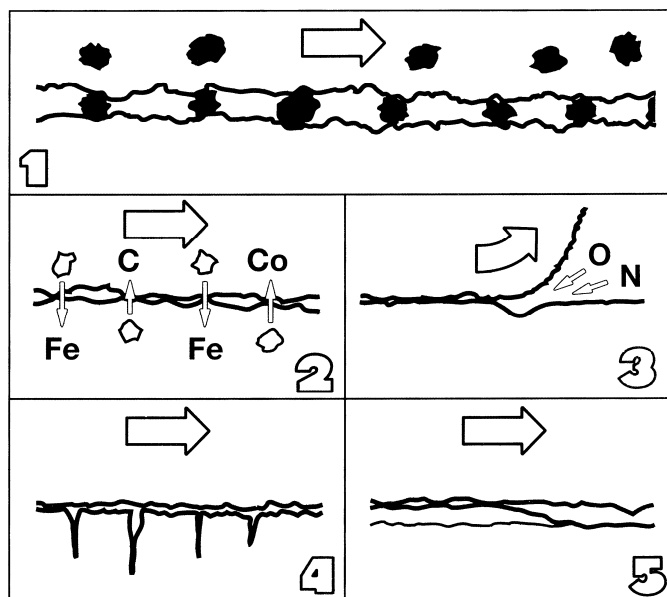
Všechny břity řezných nástrojů podléhají při obrábění určitému opotřebení, kterému jsou vystaveny až do okamžiku dosažení konce trvanlivosti.[4]

Výchozí tvar a kvalita pracovních ploch břitu se postupně mění s délkou odřezávané vrstvy materiálu. Tento kontinuálně probíhající proces nazýváme *opotřebení břitu*. Proces opotřebení je velmi složitý děj, který závisí na mnoha faktorech (fyzikální a zejména mechanické vlastnosti obráběného materiálu, geometrie břitu, pracovní podmínky, pracovní prostředí atd.) a v jehož průběhu působí mnoho odlišných fyzikálně-chemických jevů (mechanismů opotřebení). [10]

Při obrábění načisto je břit vyměnitelné břitové destičky považován za opotřeбенý tehdy, není-li již schopen dosahovat požadované jakosti opracování povrchu. U hrubovacích operací se naproti tomu vyvíjí opotřebení v podstatně větších dimenzích, přičemž se nebere příliš velký ohled na stav povrchu obrobku a přesnost rozměrů a tolerují se proto podstatně větší hodnoty opotřebení.

K opotřebení břitu nástroje dochází těmito způsoby:

- a) otěrem stykových míst materiálu břitu
- b) plastickou deformací břitu
- c) křehkým porušením materiálu břitu



Obr.12 : Hlavní mechanismy opotřebení břitů nástroje při obrábění kovu [12]
(1 – abrazivní opotřebení, 2 – difúzní opotřebení, 3 – oxidační opotřebení, 4 – lom, 5 – adhezni opotřebení)

3.3.2.1 Otěr břitů

Otěr břitů je složitý *fyzikálně* (abraze, adheze) *chemický* (difúze, oxidace) proces, značně odlišný od normálního otěru strojních součástí. Intenzita otupování břitů je klíčovým ekonomickým problémem v procesu obrábění, a proto se ve všech technicky vyspělých státech věnuje mnoho práce na objasnění problematiky otěru. [7]

3.3.2.1.1 Abraze (brusný otěr)

K abrazi dochází, když tvrdost některých mikročástic obrobku převyšuje tvrdost určitých mikročástic materiálu břitů. Tvrdé mikročástice materiálu třísky, popřípadě na povrchu plochy řezu, vytvářejí mikrorýhy na stykových místech břitů s třískou a plochou řezu (viz Obr.12/1). [10]

3.3.2.1.2 Adheze

Pracovní plochy břitů, stejně jako plochy třísky, třoucí se o čelo a plochy řezu třoucí se o hřbet břitů, nejsou ideálně hladké. Mají určitou drsnost a dotýkají se proto pouze vrcholky svých nerovností (viz Obr.12/5). Důsledkem toho je vysoký měrný

tlak, což spolu s poměrně vysokou teplotou vede k vytváření lokálních spojů, tzv. mikrosvarů. Tyto mikrosvary jsou okamžitě porušeny z důvodu relativního pohybu nástroje proti obrobku. Na tvorbu mikrosvarů má vliv především chemická příbuznost materiálu břitu s materiálem obrobku, a proto se adhezní opotřebení u keramických materiálů projevuje pouze v menší míře. Ve větší míře se projevuje u uhlíkových a rychlořezných ocelí. [10]

3.3.2.1.3 Difúze

K tomuto opotřebení dochází při obrábění po dosažení vysokých teplot v oblasti stykových míst břitu s obrobkem. Hodnota teploty pak musí být tak vysoká, aby dosáhla disociační teploty některého prvku obou materiálů. Tato teplota pro prvky tvořící materiál nástroje bývá v rozmezí 680 až 1200°C. Difúzní otěr tak nastává jen u materiálů s vysokou teplotou tání (keramické materiály, slinutý karbid, diamant).

Intenzita difúze nezávisí na mechanických vlastnostech materiálů obrobku a břitu, ale na jejich chemickém složení, teplotě, měrném tlaku ve stykových místech a na relativní rychlosti s níž se difundující materiály pohybují. Mezi nejaktivnější prvky zde patří Fe a Co. Vlivem difúze prvků z materiálu břitu do materiálu třísky a obrobku dochází k rozrušení krystalové sítě mezní vrstvy materiálu břitu a tím ke vzniku defektní vrstvy o menší míře pevnosti než má ostatní materiál břitu. To vede k větší náchylnosti pro opotřebení (viz *Obr.12/2*). [6]

3.3.2.1.4 Oxidace

Oxidace se řadí k chemickým opotřebením a označujeme tak vytváření chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí (viz *Obr.12/3*). [10]

Oxidace nastává již při malé řezné rychlosti, tedy již za nízkých teplot řezání. S rostoucí teplotou intenzita oxidace roste.

Negativním následkem oxidace je rozrušení povrchové vrstvy materiálu břitu. Může však nastat i pozitivní vliv oxidace, kdy se při vyšších teplotách některé ze sloučenin dostávají do těstovitého tvaru, vytváří vysoce adhezní film a intenzitu otěru snižují. [6]

3.3.2.2 Plastická deformace

Tato forma otupování břitů je charakteristická zejména pro obrábění měkkých materiálů jako je dřevo, plastické materiály, kůže apod. Při obrábění těchto materiálů s malou tepelnou vodivostí je důležitá koncentrace tepla v nástroji. Projevuje se však také za určitých podmínek při obrábění kovů většími řeznými rychlostmi (slinuté karbidy, diamant, keramické materiály), které jsou zároveň křehké. [4]

Při plastické deformaci břitů dochází ke kontinuálnímu přesunu plasticky deformované vrstvičky materiálu břitů (o tloušťce řádově v nm) na stykových plochách břitů. Plasticita vzniká při mechanickém zatížení spolu se zahřátím této vrstvy. [6]

3.3.2.3 Křehký lom

Porušení břitů v oblasti jeho ostří nastává při ostření břitů nebo při práci nástroje. Při ostření břitů se vylamují částčky materiálu na přechodové hraně hřbetu a čela (vznik mikrotrhlin), a to ve větší míře do plochy čela (viz *Obr. 12/4*). [6]

Dochází k němu náhle, překročí-li zatížení některého místa břitů pevnost v ohybu. Příčiny jsou: tepelný ráz, neúměrně velký průřez odřezávané vrstvy, okamžité zvýšení řezného odporu, mechanický ráz při obrábění přerušovaným řezem. [9]

3.3.3 Destičky s dvojitou fazetkou

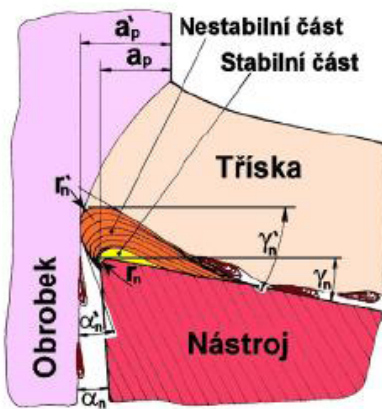
Z dlouhodobého měření opotřebení řezné keramiky bylo zjištěno, že po jistém čase dojde k opotřebení břitů destičky zhruba pod úhlem 15° . Tuto vzniklou plošku měl následně vyplnit vznikající nárůstek. Rozhodlo se zkusit obrátit tento negativní vliv k pozitivnímu tím, že opotřebení, které při obrábění vzniká se již připraví dopředu ve formě druhé fazetky. Dle názorů odborníků se tato fazetka vyplní v krátkém okamžiku nárůstkem, který nahradí břit, čímž dojde ke snížení brusného otěru nástroje, které má největší vliv na opotřebení destičky. [5]

3.3.4 Tvorba nárůstku [13]

Při realizaci řezného procesu za určitých řezných podmínek (v daném intervalu řezné rychlosti) se tvoří na čele nástroje spěchovaná tvrdá vrstva kovu, která ulpívá na břitu ostří, tzv. nárůstek. Nárůstek je tedy silně spěchovaná vrstva obráběného materiálu, která má v důsledku probíhajících pochodů odlišnou strukturu a je charakterizována vysokou pevností a tvrdostí. Vytváří se periodicky. V závislosti na řezných podmínkách je tvoření a zanikání nárůstku periodickým procesem s frekvencí 102 až 103 Hz. Intenzita vzniku nárůstku je primárně dána řeznými podmínkami.

Nárůstek má dvě části, a to stabilní a nestabilní (viz *Obr.13*). Převážnou část nárůstku odnáší tříska, menší část přilne na obrobenou plochu. Vzhledem ke svým vlastnostem může po určitou dobu přebírat funkci břitu a chránit tím řezný nástroj před jeho opotřebením. Tvorba nárůstku nejzávažněji ovlivňuje:

- Mění geometrii nástroje (zvětšuje poloměr zaoblení ostří, zvětšuje úhel čela, zvětšuje úhel hřbetu, zmenšuje úhel řezu),
- mění skutečné rozměry obrobku v důsledku rozdílných hodnot požadované hloubky řezu a výsledné hloubky řezu při vzniku nárůstku,
- zhoršuje strukturu obrobené plochy (nestabilní část nárůstku na ní ulpívá),
- způsobuje samobuzené kmitání soustavy stroj-nástroj-obrobek.



Obr.13 : Tvorba nárůstku u kořene třísky [13]

Zabránění vzniku nárůstku je možno provést vhodnou volbou řezných podmínek, zejména zvýšením rychlosti řezání, nebo také využitím vhodné procesní kapaliny, lapováním čelní plochy nástroje apod. S rostoucí pevností obráběného materiálu velikost nárůstku klesá. Proto se pro některé operace, jako je např. řezání závitů, výroba ozubení a protahování materiál zušlechťuje. [13]

4. Praktická měření

4.1 Příprava experimentu

4.1.1 Použitá zařízení

Experiment byl proveden na soustruhu SU50 korejské výroby s příkonem 11 kW (viz *Obr.14*), kde není plynulá změna otáček (řezná rychlost se mění s průměrem obrobku), která by pro náš případ byla vhodnější. S ohledem na předchozí diplomové práce, u nichž byl použit stejný soustruh, je však měření porovnatelnější.



Obr.14 : Soustruh korejské výroby SU50

Pro měření opotřebení destičky byl zvolen dílenský mikroskop CARL-ZEISS JENA, typ 970 (viz *Obr.15*), který měří s přesností 0,01 mm. Pro upnutí destičky byl použit malý svěrák.



Obr.15 : Dílenský mikroskop CARL-ZEISS JENA, typ 970

Pro měření skutečných otáček byl použit digitální měřič otáček ONO SOKKI HT 3100 s přesností $\pm 0,1 \text{ min}^{-1}$.

4.1.2 Obráběný materiál

Pro provedení experimentu byl použit materiál z šedé litiny legované 42 2425, a to vložky válců odlité ve společnosti AGS Jičín, a.s. do pískové formy metodou odstředivého lité, což zajišťuje stejnoměrné vlastnosti všech odlitků.

Problémem byl nedostatek vložek, které byly jen 2, u kterých jsem si musel kůru předem odstranit slinutým karbidem. Tvrdost těchto vložek byla již stanovena v předchozích pracích, a to v rozmezí 263 až 285 HB.

V *příloze 1* jsou uvedeny veškeré vlastnosti obrobku včetně složení jednotlivých legur dané litiny (tzv. Materiálový list). Výkres původního obrobku před obrobením včetně tolerancí, předepsané drsnosti, je uveden v *příloze 2*.

4.1.3 Použitá řezná keramika

Z důvodu nedostatku obráběného materiálu byla použita pouze jedna destička z *oxidové směsné řezné keramiky* ve složení $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiCN}$. Destička má dle ISO 1832 označení:

- **Kennametal SNGN120708T02020 - KY1615 (dále už jen KY1615).**

Údaje o této destičce je možno určit dle předchozí normy a dle *přílohy 3*. Základní charakteristika této destičky:

- Čtvercový průřez,
- bez funkčního otvoru a utvařeče,
- poloměr zaoblení špičky $r = 0.8 \text{ mm}$,
- rozměr destičky $12,7 \text{ mm} \times 7,94 \text{ mm}$, šířka $12,7 \text{ mm}$ (d x š x v).

4.1.4 Stanovení řezných podmínek

Mezi řezné podmínky, které byly nutno stanovit, patří řezná rychlost v_c , hloubka řezu a_p a posuv f .

V předchozích pracích byla velikost hloubky řezu většinou $a_p = 1 \text{ mm}$. Z důvodu nedostatku materiálu a jelikož hloubka řezu nemá podstatný vliv na trvanlivost ostří, jen zdánlivě nepatrný, volím hloubku řezu pro můj případ $a_p = 0.5 \text{ mm}$, a to u všech třech zkoumaných břitů.

Otáčky byly po konzultaci s vedoucím diplomové práce zvoleny v řadě $n_1 = 560 \text{ min}^{-1}$, $n_2 = 710 \text{ min}^{-1}$, $n_3 = 900 \text{ min}^{-1}$.

Posuv byl zachován v souladu s předchozími pracemi, jeho hodnota činí $f = 0.2 \text{ mm/ot}$.

Jelikož nebyl k dispozici soustruh s plynulou změnou otáček, musel jsem použít více obrobků stejného (či podobného průměru), protože se změna řezné rychlosti musí udržovat v co nejužším intervalu. Bylo proto nutné spočítat průměrnou řeznou rychlost s odchylkou této řezné rychlosti.

4.1.5 Upnutí obrobku

Obrobky byly s pomocí vysokozvižného jeřábu upnuty do tříčelistového sklíčidla za vnitřní průměr a na druhé straně pomocí přípravku podepřeném koníkem též za vnitřní průměr obrobku.

4.1.6 Metodika zpracování výsledků měření

Pro toto měření jsem zvolil jednu ze dvou metod, a to *metodu přibližného vyhodnocení* (tzv. *odhadem*). Způsob vyhodnocování a jednotlivé postupy jsem dále popsal v „Syntéze naměřených hodnot“ (viz *kap.5*), tematika „Metodika zpracování výsledků“ (viz *kap.5.1.6*).

4.2 Měření a zpracování hodnot

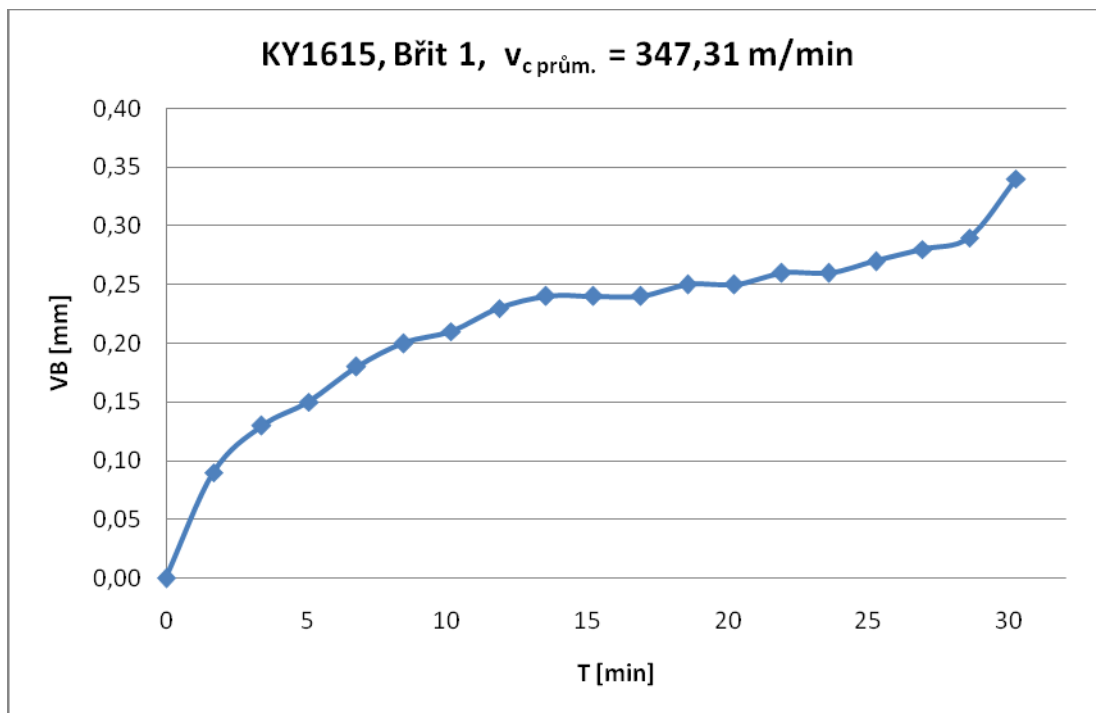
4.2.1 Břit 1

Řezné podmínky pro *Břit 1* jsou následující:

- Posuv na otáčku $f = 0,2 \text{ mm/ot}$,
- hloubka řezu $a_p = 0,5 \text{ mm}$,
- otáčky $n = 560 \text{ ot/min}$.

měření	čas (s)	Σ čas (s)	Σ čas (min)	VB (mm)	D (mm)	ns (ot/min)	vc (m/min)	obrobek
0	0	0	0	0	186,8	0	0	31
1	101	101	1,68	0,09	186,8	600	352,10	31
2	102	203	3,38	0,13	186,8	602	353,27	31
3	101	304	5,07	0,15	185,8	603	351,97	31
4	102	406	6,77	0,18	185,8	599	349,63	31
5	101	507	8,45	0,2	184,8	601	348,91	31
6	101	608	10,13	0,21	184,8	603	350,07	31
7	102	710	11,83	0,23	183,8	602	347,60	31
8	101	811	13,52	0,24	183,8	600	346,44	31
9	101	912	15,20	0,24	182,8	602	345,71	31
10	100	1012	16,87	0,24	182,8	601	345,13	31
Průměrná řezná rychlost Břitu 1, obrobku 31 je							349,08	m/min
11	100	1112	18,53	0,25	184,7	599	347,56	57
12	101	1213	20,22	0,25	184,7	600	348,14	57
13	100	1313	21,88	0,26	183,7	600	346,26	57
14	100	1413	23,55	0,26	183,7	602	347,41	57
15	101	1514	25,23	0,27	182,7	599	343,80	57
16	100	1614	26,90	0,28	182,7	602	345,52	57
17	100	1714	28,57	0,29	181,7	601	343,06	57
18	100	1814	30,23	0,34	181,7	600	342,49	57
Průměrná řezná rychlost Břitu 1, obrobku 57 je							345,53	m/min

Tab.5 : Tabulka naměřených hodnot pro Břit 1



Obr.14 : Graf závislosti $VB = f(t)$ pro Břit 1

Průměrná řezná rychlost:

$$v_{cp1} = \frac{v_{cp(\text{obrobku31})} + v_{cp(\text{obrobku57})}}{2} = \frac{349,08 + 345,53}{2} = 347,31 \text{ m/min}$$

Odchylka řezné rychlosti:

$$\Delta v_{cp1} = v_{c\text{max}} - v_{c\text{min}} = 352,10 - 342,49 = 9,61 \text{ m/min}$$

Závěr měření Břitu 1:

- Měření proběhlo v pořádku, bylo dosaženo kritického opotřebení.
- Celková odchylka řezné rychlosti 9,61 m/min je v patřičné toleranci.
- Průměrná řezná rychlost BŘITU 1 je 347,31 m/min s horní odchylkou +4,79 m/min a dolní -4,82 m/min.

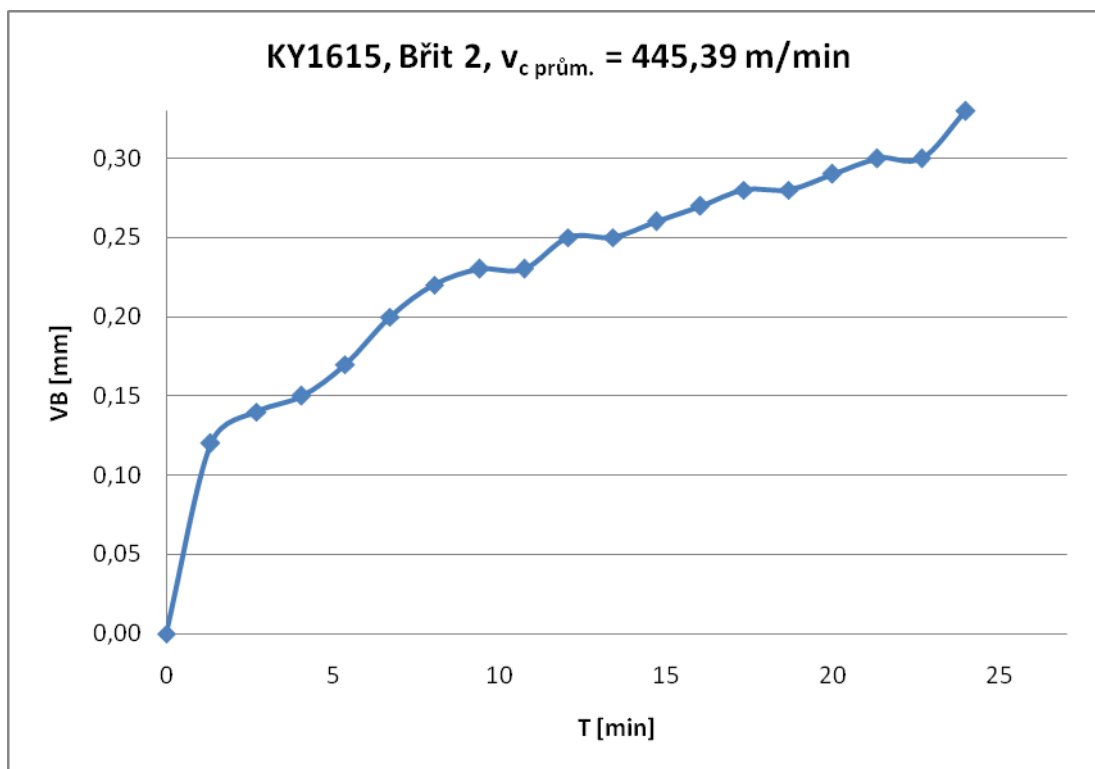
4.2.2 Břit 2

Řezné podmínky pro *Břit 2* jsou následující:

- Posuv na otáčku $f = 0,2 \text{ mm/ot}$,
- hloubka řezu $a_p = 0,5 \text{ mm}$,
- otáčky $n = 710 \text{ ot/min}$.

měření	čas (s)	Σ čas (s)	Σ čas (min)	VB (mm)	D (mm)	ns (ot/min)	vc (m/min)	obrobek
0	0	0	0,00	0	181,2	0	0,00	31
1	80	80	1,33	0,12	181,2	750	426,93	31
2	82	162	2,70	0,14	181,2	749	426,36	31
3	81	243	4,05	0,15	180,2	752	425,71	31
4	79	322	5,37	0,17	180,2	750	424,57	31
5	80	402	6,70	0,2	179,2	751	422,78	31
6	80	482	8,03	0,22	179,2	749	421,65	31
7	81	563	9,38	0,23	178,2	750	419,86	31
8	80	643	10,72	0,23	178,2	749	419,30	31
9	80	723	12,05	0,25	177,2	751	418,06	31
10	80	803	13,38	0,25	177,2	750	417,51	31
Průměrná řezná rychlost Břitu 2, obrobku 31 je							422,27	m/min
11	78	881	14,68	0,26	180,3	749	424,24	57
12	79	960	16,00	0,27	180,3	750	424,81	57
13	79	1039	17,32	0,28	179,3	752	423,58	57
14	80	1119	18,65	0,28	179,3	751	423,02	57
15	79	1198	19,97	0,29	178,3	750	420,10	57
16	80	1278	21,30	0,3	178,3	751	420,66	57
17	80	1358	22,63	0,3	177,3	752	418,85	57
18	80	1438	23,97	0,33	177,3	750	417,74	57
Průměrná řezná rychlost Břitu 2, obrobku 57 je							421,62	m/min

Tab.6 : Tabulka naměřených hodnot pro *Břit 2*



Obr.15 : Graf závislosti $VB = f(t)$ pro Břit 2

Průměrná řezná rychlost:

$$v_{cp1} = \frac{v_{cp(\text{obrobku31})} + v_{cp(\text{obrobku57})}}{2} = \frac{422,27 + 421,62}{2} = 421,95 \text{ m/min}$$

Odchylka řezné rychlosti:

$$\Delta v_{cp1} = v_{c \text{ max}} - v_{c \text{ min}} = 426,93 - 417,51 = 9,42 \text{ m/min}$$

Závěr měření Břitu 2:

- Měření proběhlo v pořádku, bylo dosaženo kritického opotřebení.
- Celková odchylka řezné rychlosti 9,42 m/min je v patřičné toleranci.
- Průměrná řezná rychlost je 421,95 m/min s horní odchylkou +4,98 m/min a dolní -4,44 m/min.

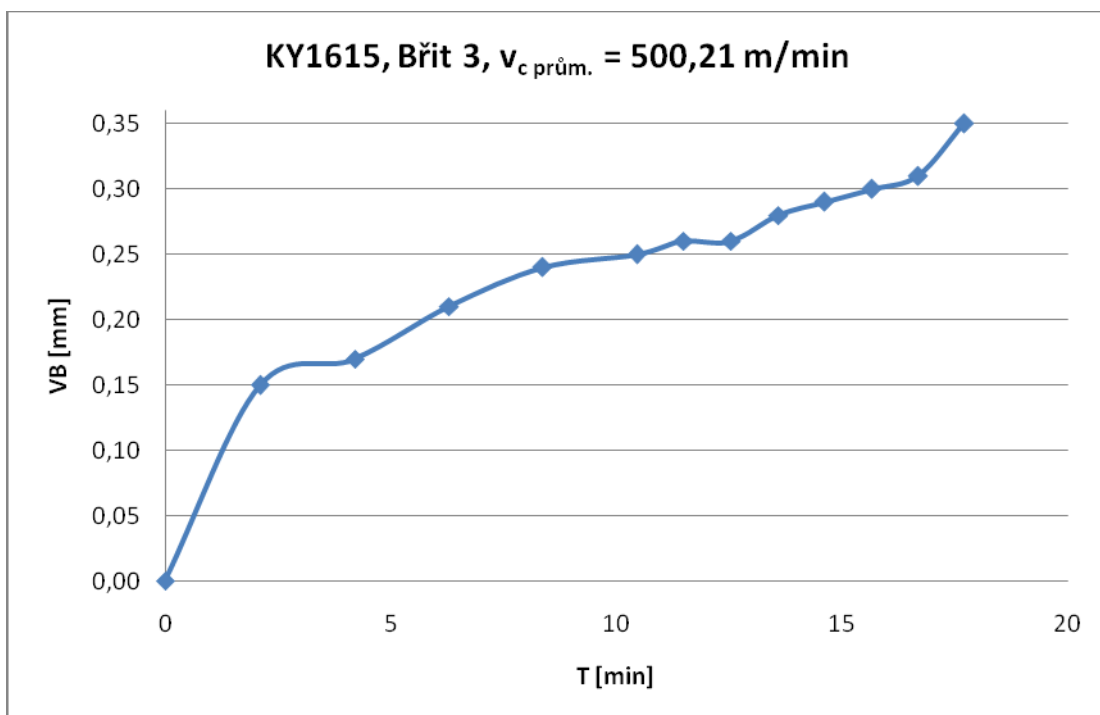
4.2.3 Břit 3

Řezné podmínky pro *Břit 3* jsou následující:

- Posuv na otáčku $f = 0,2 \text{ mm/ot}$,
- Hloubka řezu $a_p = 0,5 \text{ mm}$,
- Otáčky $n = 900 \text{ ot/min}$.

měření	čas (s)	Σ čas (s)	Σ čas (min)	VB (mm)	D (mm)	n_s (ot/min)	v_c (m/min)	obrobek
0	0	0	0,00	0	175,9	0	0,00	31
1	126	126	2,10	0,15	175,9	915	505,62	31
2	126	252	4,20	0,17	174,9	914	502,20	31
3	125	377	6,28	0,21	173,9	911	497,69	31
4	125	502	8,37	0,24	172,9	915	497,00	31
5	125	627	10,45	0,25	171,9	915	494,12	31
Průměrná řezná rychlost Břitu 3, obrobku 31 je							499,32	m/min
6	62	689	11,48	0,26	176,1	912	504,53	57
7	63	752	12,53	0,26	176,1	914	505,64	57
8	63	815	13,58	0,28	175,1	911	501,12	57
9	62	877	14,62	0,29	175,1	911	501,12	57
10	63	940	15,67	0,3	174,1	912	498,80	57
11	61	1001	16,68	0,31	174,1	914	499,90	57
12	61	1062	17,70	0,35	173,1	913	496,48	57
Průměrná řezná rychlost Břitu 3, obrobku 57 je							501,09	m/min

Tab.7 : Tabulka naměřených hodnot pro Břit 3



Obr.16 : Graf závislosti $VB = f(t)$ pro Břit 3

Průměrná řezná rychlost:

$$v_{cp1} = \frac{v_{cp(\text{obrobku31})} + v_{cp(\text{obrobku57})}}{2} = \frac{499,32 + 501,09}{2} = 500,21 \text{ m/min}$$

Odchylka řezné rychlosti:

$$\Delta v_{cp1} = v_{c \text{ max}} - v_{c \text{ min}} = 505,62 - 494,12 = 11,5 \text{ m/min}$$

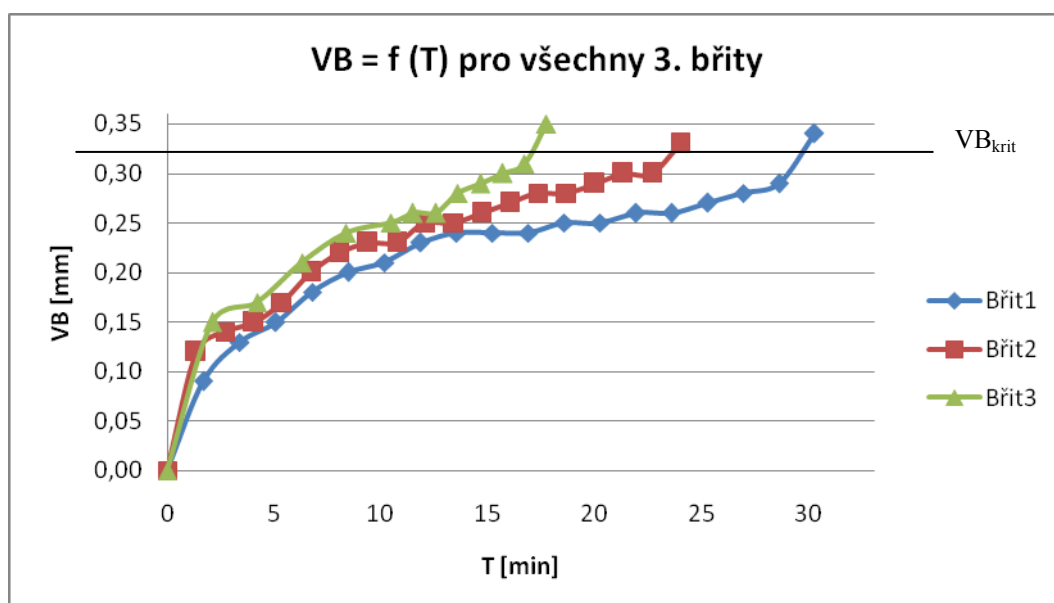
Závěr měření Břitu 2:

- Měření proběhlo v pořádku, bylo dosaženo kritického opotřebení.
- Celková odchylka řezné rychlosti 11,5 m/min je v patřičné toleranci.
- Průměrná řezná rychlost je 500,21 m/min s horní odchylkou +5,41 m/min a dolní -6,09 m/min.

4.3 Vyhodnocení experimentu

4.3.1 Stanovení VB_{krit}

Z grafů naměřených hodnot a posléze aritmetickým průměrem pro všechny tři bříty jsem odečetl, že hodnota pro kritické opotřebení je 0,32 mm (viz Obr.17).



Obr.17 : Graf závislosti $VB = f(t)$ pro všechny tři bříty

4.3.2 Stanovení trvanlivostí jednotlivých břitů

Trvanlivosti stanovím na základě naměřených hodnot z tabulek (viz Tab.5 až Tab.7):

Číslo bříty	t_A (min)	VB_A (mm)	t_B (min)	VB_B (mm)
1	28,57	0,29	30,23	0,34
2	22,63	0,30	23,97	0,33
3	16,68	0,31	17,70	0,35

Tab.8 : Hodnoty pro výpočet trvanlivostí všech tří břitů

Dále podle vztahu (10) stanovím jednotlivé trvanlivosti:

$$T = t_A + \left[\frac{t_B - t_A}{VB_B - VB_A} \cdot (VB_{krit} - VB_A) \right] \quad (10)$$

$$T_1 = 28,57 + \left[\frac{30,23 - 28,57}{0,34 - 0,29} \cdot (0,32 - 0,29) \right] = 29,57 \text{ min}$$

$$T_2 = 22,63 + \left[\frac{23,97 - 22,63}{0,33 - 0,30} \cdot (0,32 - 0,30) \right] = 23,52 \text{ min}$$

$$T_3 = 16,68 + \left[\frac{17,70 - 16,68}{0,35 - 0,31} \cdot (0,32 - 0,31) \right] = 16,93 \text{ min}$$

4.3.3 Výpočet konstant a exponentu Taylorova vztahu

Konstanty Taylorova vztahu spočítám pro komplexní Taylorův vztah a pro klasický Taylorův vztah, abych následně porovnal rozdíl vlivu parametrů hloubky řezu a_p a posuvu f na výsledné hodnoty.

4.3.3.1 Výpočet exponentu m a úhlu strmosti křivky

Ze znalostí vypočtených trvanlivostí jednotlivých břitů při konkrétních průměrných rychlostech mohu dle vztahu (11) vypočítat exponent Taylorova vztahu m :

$$m = \frac{\log T_1 - \log T_2}{\log v_2 - \log v_1} \quad (11)$$

Dosazením hodnot do tohoto vztahu (viz Tab.5) pro Břit 1 a nastavené otáčky stroje $n_1=710 \text{ min}^{-1}$, kde $v_1=421,95 \text{ m/min}$, $T_1=23,52 \text{ min}$ a pro Břit 2 (viz Tab.6) a nastavené otáčky stroje $n_2=560 \text{ min}^{-1}$, kde $v_2=347,31 \text{ m/min}$, $T_2=29,57 \text{ min}$, dostaneme hodnotu m :

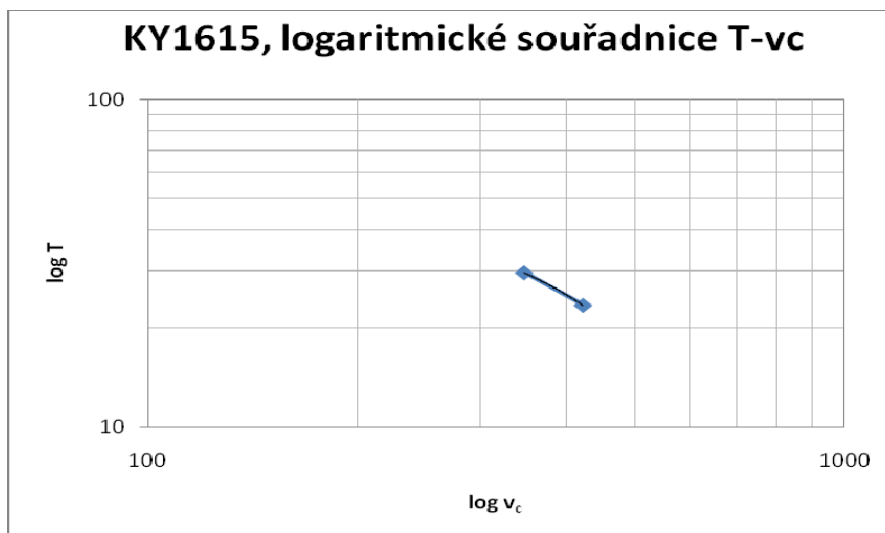
$$m = \frac{\log 23,52 - \log 29,57}{\log 347,31 - \log 421,95} = 1,17589$$

Ze znalosti konstanty m mohu vypočítat úhel strmosti křivky α , protože platí mezi tímto úhlem a touto vypočtenou konstantou vztah (viz Obr.10):

$$\alpha = \arctg(m) \quad (12)$$

Dosazením do vztahu (12) získám hodnotu strmosti křivky (viz Obr.18):

$$\alpha = \arctg(1,17589) = 49^\circ 37'$$



Obr.18 : Graf závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti v log.souřadnicích

4.3.3.2 Výpočet konstant Taylorova vztahu

4.3.3.2.1 Klasický Taylorův vztah

Ze vztahu (6) si odvodím vztah pro výpočet koeficientu C_T a neboť všechny hodnoty již znám, mohu si tuto hodnotu rovnou vypočítat:

$$C_T = T_1 \cdot v_1^m = 23,52 \cdot 421,95^{1,17596} = 28750$$

Dále si ze vztahu (6) odvodím vztah pro výpočet koeficientu C_V a ze znalostí všech hodnot ho rovnou mohu vypočítat:

$$C_V = T_1^{\frac{1}{m}} \cdot v_1 = 23,52^{\frac{1}{1,17589}} \cdot 421,95 = 6187$$

4.3.3.2 Komplexní Taylorův vztah

Ze vztahu (8) si odvodím vztah pro výpočet koeficientu C_T a neboť všechny hodnoty již znám, mohu si tuto hodnotu rovnou vypočítat:

$$C'_T = T_1 \cdot v_1^m \cdot a_p^{X_v} \cdot f^{Y_v} = 23,52 \cdot 421,95^{1,17596} \cdot 0,5^{0,3} \cdot 0,2^{0,7} = 7569$$

Dále si ze vztahu (8) odvodím vztah pro výpočet koeficientu C_V a ze znalostí všech hodnot ho rovnou mohu vypočítat:

$$C'_V = T_1^{\frac{1}{m}} \cdot v_1 \cdot a_p^{X_v} \cdot f^{Y_v} = 23,52^{\frac{1}{1,17589}} \cdot 421,95 \cdot 0,5^{0,3} \cdot 0,2^{0,7} = 1629$$

4.3.4 Řezné rychlosti pro dané trvanlivosti

4.3.4.1 Klasický Taylorův vztah

Dle vztahu (6) mohu dále vypočítat řezné rychlosti při daných trvanlivostech řezné destičky:

$$v_c = \frac{C_v}{T^{\frac{1}{m}}} \left[\text{m} \cdot \text{min}^{-1} \right], \quad \text{kde } T = 3, 5, 10 \text{ min.}$$

Dosazením vypočítaných hodnot s danými trvanlivostmi do tohoto vztahu získáváme řezné rychlosti:

$$v_{c3} = \frac{C_v}{3^{\frac{1}{m}}} = \frac{6187}{3^{\frac{1}{1,17589}}} = 2430,67 \text{ m/min}$$

$$v_{c5} = \frac{C_v}{5^{\frac{1}{m}}} = \frac{6187}{5^{\frac{1}{1,17589}}} = 1574,21 \text{ m/min}$$

$$v_{c10} = \frac{C_v}{10^{\frac{1}{m}}} = \frac{6187}{10^{\frac{1}{1,17589}}} = 873,09 \text{ m/min}$$

4.3.4.2 Komplexní Taylorův vztah

Dle vztahu (8) mohu dále vypočítat řezné rychlosti při daných trvanlivostech řezné destičky:

$$v_c = \frac{C'_V}{T^{\frac{1}{m}} \cdot a_p^{X_v} \cdot f^{Y_v}} \left[\text{m} \cdot \text{min}^{-1} \right], \quad \text{kde } T = 3, 5, 10 \text{ min.}$$

Dosazením vypočítaných hodnot s danými trvanlivostmi do tohoto vztahu získáváme řezné rychlosti:

$$v_{c3} = \frac{C'_V}{3^{\frac{1}{m}} \cdot a_p^{X_v} \cdot f^{Y_v}} = \frac{1629}{3^{\frac{1}{1,17589}} \cdot 0,5^{0,3} \cdot 0,2^{0,7}} = 2430,837 \text{ m/min}$$

$$v_{c5} = \frac{C'_V}{5^{\frac{1}{m}} \cdot a_p^{X_v} \cdot f^{Y_v}} = \frac{1629}{5^{\frac{1}{1,17589}} \cdot 0,5^{0,3} \cdot 0,2^{0,7}} = 1574,314 \text{ m/min}$$

$$v_{c10} = \frac{C'_V}{10^{\frac{1}{m}} \cdot a_p^{X_v} \cdot f^{Y_v}} = \frac{1629}{10^{\frac{1}{1,17589}} \cdot 0,5^{0,3} \cdot 0,2^{0,7}} = 873,151 \text{ m/min}$$

4.3.5 Trvanlivosti při daných řezných rychlostech

4.3.4.1 Klasický Taylorův vztah

Dle vztahu (8) mohu dále vypočítat trvanlivosti při daných řezných rychlostech řezné destičky:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \left[\text{m} \cdot \text{min}^{-1} \right], \quad \text{kde } v_c = 200, 300, 400, 500, 600, 700 \text{ m/min.}$$

Dosazením vypočítaných hodnot s danými řeznými rychlostmi do tohoto vztahu získáváme trvanlivosti:

$$T_{200} = \frac{C_T}{200^m} = \frac{28750}{200^{1,17589}} = 56,61 \text{ min}$$

$$T_{300} = \frac{C_T}{300^m} = \frac{28750}{300^{1,17589}} = 35,14 \text{ min}$$

$$T_{400} = \frac{C_T}{400^m} = \frac{28750}{400^{1,17589}} = 25,06 \text{ min}$$

$$T_{500} = \frac{C_T}{500^m} = \frac{28750}{500^{1,17589}} = 19,27 \text{ min}$$

$$T_{600} = \frac{C_T}{600^m} = \frac{28750}{600^{1,17589}} = 15,55 \text{ min}$$

$$T_{700} = \frac{C_T}{700^m} = \frac{28750}{700^{1,17589}} = 12,98 \text{ min}$$

4.3.4.2 Komplexní Taylorův vztah

Dle vztahu (8) mohu dále vypočítat trvanlivosti při daných řezných rychlostech řezné destičky:

$$T = \frac{C'_T}{v_c^m \cdot a_p^{X_v} \cdot f^{Y_v}} \left[\text{m} \cdot \text{min}^{-1} \right], \text{ kde } v_c = 200, 300, 400, 500, 600, 700 \text{ m/min.}$$

Dosazením vypočítaných hodnot s danými řeznými rychlostmi do tohoto vztahu získáváme trvanlivosti:

$$T_{200} = \frac{C'_T}{200^m \cdot a_p^{X_v} \cdot f^{Y_v}} = \frac{7569}{200^{1,17589} \cdot 0,5^{0,3} \cdot 0,2^{0,7}} = 56,60 \text{ min}$$

$$T_{300} = \frac{C'_T}{300^m \cdot a_p^{X_v} \cdot f^{Y_v}} = \frac{7569}{300^{1,17589} \cdot 0,5^{0,3} \cdot 0,2^{0,7}} = 35,14 \text{ min}$$

$$T_{400} = \frac{C'_T}{400^m \cdot a_p^{X_v} \cdot f^{Y_v}} = \frac{7569}{400^{1,17589} \cdot 0,5^{0,3} \cdot 0,2^{0,7}} = 25,05 \text{ min}$$

$$T_{500} = \frac{C'_T}{500^m \cdot a_p^{X_v} \cdot f^{Y_v}} = \frac{7569}{500^{1,17589} \cdot 0,5^{0,3} \cdot 0,2^{0,7}} = 19,27 \text{ min}$$

$$T_{600} = \frac{C'_T}{600^m \cdot a_p^{X_v} \cdot f^{Y_v}} = \frac{7569}{600^{1,17589} \cdot 0,5^{0,3} \cdot 0,2^{0,7}} = 15,55 \text{ min}$$

$$T_{700} = \frac{C'_T}{700^m \cdot a_p^{X_v} \cdot f^{Y_v}} = \frac{7569}{700^{1,17589} \cdot 0,5^{0,3} \cdot 0,2^{0,7}} = 12,97 \text{ min}$$

4. 4 Celkové shrnutí experimentu

Taylorův vztah	VBk (mm)	Ct (-)	Cv (-)	m (-)	Břítů	Otáčky (min ⁻¹)
Klasický	0,32	28750	6187	1,18	3	560, 710, 900
Komplexní		7569	1629			

Tab.9 : Konstanty Taylorova vztahu, VBkr

n = 560 min ⁻¹		n = 710 min ⁻¹		n = 900 min ⁻¹	
T (min)	Vc (m/min)	T (min)	Vc (m/min)	T (min)	Vc (m/min)
29,57	347,31	23,52	421,95	16,93	500,21

Tab.10: Hodnoty T a v_c pro všechny použité otáčky na stroji

Taylorův vztah	T=3min	T=5min	T=10min
Klasický	2430,67	1574,21	873,09
Komplexní	2430,837	1574,314	873,151

Tab.11 : Hodnoty vypočtených řezných rychlosti pro dané trvanlivosti

Taylorův vztah	Vc [m/min]					
	200	300	400	500	600	700
Klasický	56,61	35,14	25,06	19,27	15,55	12,98
Komplexní	56,60	35,14	25,05	19,27	15,55	12,97

Tab.12 : Hodnoty vypočtených trvanlivostí pro dané řezné rychlosti

4.5 Závěr praktického měření

U měřené destičky KY1615 byly proměřeny 3.břity, přičemž rozsah provedených měření byl omezen počtem obrobků. Pro lepší statistické zpracování výsledků měření by bylo zapotřebí změřit co nejvíce břitů této destičky ve stejné řadě otáček (560, 710, 900). Vyloučil, resp. minimalizoval by se tím vliv nepředvídatelných náhodných jevů, které zvyšují rozptyl naměřených hodnot trvanlivostí (viz *kap.7.6*).

Trvanlivosti a řezné rychlosti byly vypočteny jak klasickým Taylorovým vztahem, tak komplexním Taylorovým vztahem, abych porovnal vliv hloubky řezu a posuvu na řezné vlastnosti. Z *Tab.11* a *Tab.12* je zřejmé, že hloubka řezu a posuv má nepatrný vliv na řezné vlastnosti (trvanlivost a řezné rychlosti), někde jsou výsledky dokonce totožné.

Výsledkem měření jsou konstanty Taylorova vztahu C_t , C_v , m (viz *Tab.9*), včetně logaritmického grafu závislosti $T=f(vc)$ (viz *Obr.18*). Podle rozsahu hodnot exponentu m pro řezkou keramiku (viz *Tab.6*), který je v rozmezí **1,2 až 2,5**, lze říci, že destička KY1615 se v tomto rozmezí nenachází, a sice je něco málo pod spodní hodnotou tohoto rozsahu ($m=1,18$ – viz *Tab.9*). Obecně platí, že čím je hodnota tohoto exponentu menší, tím je materiál nástroje vhodnější pro vysoké řezné rychlosti. Z toho lze vyvodit, že destička je méně citlivá na změnu řezné rychlosti, a že se hodí právě pro vysoké řezné rychlosti.

Dle Taylorova vztahu (6) byly vypočteny trvanlivosti pro řezné rychlosti v rozsahu **200 až 700 m/min**, stejně jako pro ostatní destičky (viz *kap.5*). Musí být splněna zásada, že při maximální možné řezné rychlosti nesmí být trvanlivost menší než **5.minut**. Tato zásada v tomto rozsahu řezných rychlostí je splněna a po experimentálních výpočtech jsem zjistil, že právě pro tuto hranici trvanlivosti $T=5 \text{ min}$ je řezná rychlost $v_c=1574,21 \text{ m/min}$ (viz *Tab.11*), což je výsledek na oxidovou řeznou keramiku poměrně slušný.

Závěrem lze tedy říci, že tato řezná keramika je vhodná pro obrábění vyššími řeznými rychlostmi, přičemž na změnu řezné rychlosti je méně citlivá.

V analytické studii bude tato destička porovnána s doposud změřenými keramickými destičkami.

5. Syntéza naměřených hodnot

5.1 Shrnutí podmínek měření a jeho metodika

Syntetická studie naměřených hodnot si klade za cíl sjednotit všechny naměřené hodnoty z experimentů dlouhodobých zkoušek trvanlivostí pro řeznou keramiku i slinuté karbidy a následně stanovit rozsahy konstant Taylorova vztahu pro oxidovou a nitridovou keramiku, posléze je porovnat s hodnotami pro slinuté karbidy. Veškeré tyto experimenty byly provedeny v laboratořích TU v Liberci celkem v devíti diplomových pracích, včetně mé, uvedených v seznamu použité literatury a v každé tabulce této kapitoly přiděleným číslem diplomové práce KOM XXX.

Výrobce všech destiček uvádím v seznamu použitých symbolů a zkratk na začátku této práce.

5.1.1 Použitá řezná keramika

Celkem bylo proměřeno 44. destiček z řezné keramiky, jedná se však o 19. různých typů z čehož je 6. typů destiček z oxidové (celkem 16. kusů destiček) a 13. typů destiček z nitridové keramiky (celkem 28. kusů destiček). Některé typy byly proměřeny vícekrát a jejich výsledky lze tudíž brát za komplexnější.

V následujících tabulkách (viz *Tab.18 až Tab.25*) je souhrn všech hodnot destiček pro řeznou keramiku a pro slinuté karbidy (viz *Tab.28 až Tab.31*), a to buď změřených nebo zjištěných výpočtem.

5.1.2 Řezné podmínky

Téměř u všech experimentů byly použity stejné řezné podmínky, a to posuv na otáčku $f=0,2 \text{ mm/ot}$ a hloubka řezu $a_p=1 \text{ mm}$. Vyjimku tvoří diplomová práce KOM 935, která byla počátkem veškerých měření řezné keramiky na TU v Liberci při obrábění šedé litiny, kdy se experimentovalo s přípustnými posuvy i hloubkou řezu, aby to v zásadní míře nemělo vliv na výkon stroje. V této práci (KOM 935) byla proto zpočátku zvolena rychlost posuvu $f=0,3 \text{ mm/ot}$. Zjistilo se však, že posuv na změnu vlastností destiček nemá zásadní vliv, ovšem na výkonnost stroje to vliv mělo (otáčky byly menší). Proto se od tohoto posuvu odstoupilo a používalo se jen zmíněných $f=0,2 \text{ mm/ot}$. Co se týče hloubky řezu, je to obdobný případ jako u rychlosti posuvu, a sice, že

nemá zásadní vliv na změnu vlastností destiček, avšak na výkon stroje vliv má. V práci KOM 935 bylo experimentováno s hloubkou řezu $a_p=2\text{ mm}$, od které se však ustoupilo z důvodu výkonnosti stroje a používalo se $a_p=1,5\text{ mm}$.

U mnou měřené destičky jsem volil hodnotu rychlosti posuvu stejnou jako ve většině případů, a to $f=0,2\text{ mm/ot}$ a hloubku řezu $a_p=0,5\text{ mm}$, která je v porovnání s předchozími hodnotami menší. Podle Taylorova vztahu a_p nemá na trvanlivost takový vliv (jen minimální), proto jsem z důvodu nedostatku materiálu volil tuto menší hloubku řezu, což by se ve výsledku projevilo jen nepatrně. Důkaz vlivu hloubky řezu a posuvu je možno vidět v *kap.4.5*.

Otáčky se u jednotlivých experimentů lišily a byly voleny z řady otáček pro používaný soustruh SU50, a to v hodnotách $n=450, 560, 710, 900\text{ min}^{-1}$.

Pokud bychom chtěli zatížit keramické destičky řeznými rychlostmi většími než 600 m/min, musel by se použít rozhodně jiný stroj, který by stačil výkonově a nejlépe s plynulou změnou otáček.

5.1.3 Tvrdost obrobků

Před samotnými experimenty bylo nutno zjistit, zda jsou vložky válců vhodné pro dlouhodobou zkoušku trvanlivosti. To se zjišťovalo měřením tvrdosti podle Brinella, kdy na každém vzorku byla provedena tři kontrolní měření a poté byl stanoven jejich aritmetický průměr. Rozsah naměřených hodnot vložek válců se pohyboval v rozmezí 253 až 292 HB. Směrodatná odchylka se pohybuje v intervalu 0 až 14,1 HB. Zkouška potvrdila, že vložky válců mají přibližně stejnou tvrdost a jsou tudíž vhodné pro dlouhodobé zkoušky trvanlivosti. Tabulka tvrdostí všech obrobků je uveden v *příloze 4*.

5.1.4 Použitá zařízení

U všech měření byla použita stejná zařízení jako je uvedeno v praktické části (viz *kap.4.1.1*). Byl použit soustruh korejské výroby SU50, který nemá plynulou změnu otáček, která by byla pro náš případ nejlepší, proto bylo nutné u každého experimentu, pro každý břit změřit skutečné otáčky přístrojem ONO SOKKI HT 3100, a pak z nich udělat průměrnou hodnotu.

5.1.5 Obráběný materiál

Pro všechny experimenty byl použit odlitek vložky válce z šedé litiny legované 42 2425 (stejně jako v praktické části, *kap.4.1.2*) odlité ve společnosti AGS Jičín, a.s. do pískové formy metodou odstředivého lití, což zajišťuje stejnoměrné vlastnosti všech odlitků.

Než se začalo soustružit řeznou keramikou, musela se u každého obrobku odstranit podélným soustružením kůra slinutým karbidem z důvodu nerovnoměrnosti povrchu odlitku. Dále se muselo zarovnat čelo odlitku, aby kuželová vložka, vyrobená jako speciální přípravek pro upnutí, přesně zapadla do díry válce obrobku, a tím zajistila dokonalou tuhost soustavy a zminimalizovala chvění. Na druhé straně byla vložka upnuta za vnější části sklíčidla.

5.1.6 Metodika zpracování výsledků

V diplomových pracích zaměřených na výzkum řezné keramiky při obrábění šedé litiny byly použity dva základní způsoby vyhodnocení naměřených výsledků:

- Metoda přibližného vyhodnocení (tzv. odhadem) – *kap.5.1.6.2*,
- výpočtem (přes metodu nejmenších čtverců) – *kap.5.1.6.3*.

Kladl jsem si za cíl porovnat výsledné hodnoty konstant Taylorova vztahu a exponentu m obou metod zpracování výsledků, a to výpočtem na jedné vybrané destičce. Postup je takový, že v každé z metod je nejprve kapitola „Teoretické výpočty“, a pak následuje kapitola „Aplikace metody“, kde v každé z metod počítám vždy se zjištěnými hodnotami pro tu samou řeznou destičku. Tuto část zde uvádím nejenom proto, že tato práce je shrnutím veškerých metod měření dlouhodobých zkoušek trvanlivosti a znalostí o řezné keramice, ale zároveň by člověk po přečtení této práce měl mít praktické i teoretické znalosti o dané problematice. Mimojiné se z těchto výpočtů dá udělat patřičný závěr, do jaké míry se výsledky obou metod liší při aplikaci na jedné řezné destičce.

Jelikož vstupními hodnotami pro následné matematické zpracování jsou řezná rychlost v_c (nezávislá proměnná) a trvanlivost při dané řezné rychlosti T (závislá proměnná), bude jejich výpočet předcházet metodám vyhodnocení (viz *kap.5.7.1*).

5.1.6.1 Výpočet vstupních parametrů

5.1.6.1.1 Výpočet řezné rychlosti

Řezná rychlost lze při známém průměru obrobku a nastavených otáčkách stroje vypočítat podle vztahu:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (13)$$

kde: v_c – řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

D – průměr obrobku [mm]

n – otáčky vřetene [min^{-1}]

Jelikož řezná rychlost závisí především na průměru obrobku a nebyl k dispozici ani stroj s plynulou změnou otáček, bylo nutné vypočítat průměrnou řeznou rychlost pro každý břit.

5.1.6.1.2 Výpočet trvanlivosti

Při dosažení kritériálního opotřebení VB_k potřebujeme zjistit trvanlivost T , a to experimentálně, výpočtem, dle následujícího vztahu:

$$T = t_A + \left[\frac{t_B - t_A}{VB_B - VB_A} \cdot (VB_K - VB_A) \right] [\text{min}] \quad (14)$$

kde: t_A – čas dosažení nejbližší nižší hodnoty opotřebení [min]

t_B – čas dosažení nejbližší vyšší hodnoty opotřebení [min]

VB_A – vyjadřuje hodnotu opotřebení v čase t_A [mm]

VB_B – vyjadřuje hodnotu opotřebení v čase t_B [mm]

VB_K – vyjadřuje kritériální opotřebení [mm]

5.1.6.2 Vyhodnocení odhadem

5.1.6.2.1 Teoretické výpočty

Metoda tohoto vyhodnocení výsledků je méně přesná, než vyhodnocení výpočtem. Výhodou je však menší pracnost, neboť je vhodná i pro malý počet měření a byla použita i v této diplomové práci pro vyhodnocení experimentu.

Tato metoda je založena na proložení body přímkou v logaritmickém diagramu závislosti trvanlivosti T na řezné rychlosti v_c , a to bez nutnosti výpočtu optimální polohy a sklonu přímky. Konstanty C_T a C_v se následně mohou odečíst buď z grafu (viz Obr.10) nebo vypočítat dle Taylorova vztahu (6). Exponent m se určí buď také z grafu (viz Obr.10) logaritmické závislosti $T-v_c$ nebo výpočtem dle vztahů (10), (11):

$$m = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\log T_1 - \log T_2}{\log v_2 - \log v_1} \quad (15)$$

5.1.6.2.2 Aplikace metody přibližného vyhodnocení

Tato metodika je známá již z praktické části, kde je podrobně počítána a vysvětlována, proto jí zde nebudu vypočítávat, jen zde shrnu hodnoty vypočítané touto metodou pro destičku D210 z DP 980 :

Destička	VBk (mm)	Ct(-)	Cv (-)	m(-)
D210	0,32	$4,31 \cdot 10^6$	2129,28	1,99

Tab.13 : Hodnoty vypočtené metodou přibližného vyhodnocení pro D210

5.1.6.3 Vyhodnocení výpočtem – metoda nejmenších čtverců

5.1.6.3.1 Teoretické výpočty

Tato metoda je přesnější, než metoda odhadu a i přes svou vyšší pracnost je metodou častěji užívanou.

Vstupní hodnoty (řeznou rychlost v_c a jí odpovídající trvanlivost T) je třeba určit přesněji, než při vyhodnocení odhadem. Při určování trvanlivosti T již nepostačí pouhé

odečtení z grafu znázorňujícího křivku otupení. Taktéž při určování řezné rychlosti již nelze zanedbávat změnu řezné rychlosti se změnou průměru obrobku.

Metoda nejmenších čtverců je metoda umožňující stanovit koeficienty regresní závislosti – v tomto případě závislosti lineární. Lineární závislost má tvar:

$$y = a + b \cdot x \quad (16)$$

Koeficienty regresní lineární rovnice se v případě užití metody nejmenších čtverců určují z podmínky minima sumy čtverců odchylek:

$$\sum (y - a - bx)^2 = \min \quad (17)$$

Ke splnění této podmínky je nutné derivovat podle obou koeficientů, tedy:

$$\frac{\partial}{\partial a} \sum (y - a - bx)^2 = \sum 2(y - a - bx) \cdot (-1) = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum (y - a - bx)^2 = \sum 2(y - a - bx) \cdot (-x) = 0 \quad (19)$$

Nyní můžeme určit oba koeficienty regresní rovnice, které vyplývají ze vztahů (16) a (17), dostáváme:

$$an + b \sum x - \sum y = 0 \quad (20)$$

$$a \sum x + b \sum x^2 - \sum xy = 0 \quad (21)$$

Řešením těchto rovnic pak získáme vztah pro výpočet směrnice regresní přímky neboli tzv. **regresního koeficientu b** (n je počet měření):

$$b = \frac{(\sum x) \cdot (\sum y) - n \sum xy}{(\sum x)^2 - n \sum x^2} \quad (22)$$

a **regresního koeficientu a** , tj. posunutí:

$$a = \frac{1}{n} (\sum y - b \sum x) \quad (23)$$

Směrodatnou odchylku, která charakterizuje rozptýlení kolem regresní přímky pro případ x jako nezávislé proměnné a y jako závislé proměnné (tento případ), vypočítáme podle vztahu:

$$s_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - Y_i)^2}{n-2}} \quad (24)$$

kde y_i jsou pokusně nalezené hodnoty a Y_i jsou hodnoty vypočtené z regresní rovnice pro odpovídající hodnoty x_i .

Odhad směrodatné odchylky koeficientu a , tj. s_a , vypočteme dle vztahu

$$s_a = s_{y,x} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}} \quad (25)$$

kde \bar{x} je průměrná hodnota nezávislé proměnné x .

Směrodatnou odchylku koeficientu b , tj. s_b , pak vypočteme dle vztahu:

$$s_b = \frac{s_{y,x}}{\sqrt{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}} \quad (26)$$

Nyní je možno snadno určit interval spolehlivosti hodnot koeficientů a a b při použití příslušné směrodatné odchylky:

$$L_{(a)1,2} = a \pm s_a \cdot t_\alpha \quad (27)$$

$$L_{(b)1,2} = b \pm s_b \cdot t_\alpha \quad (28)$$

kde t_α je kritická hodnota Studentova rozdělení pro zvolenou hladinu významnosti α a pro počet stupňů volnosti $\nu=n-2$.

Dále můžeme určit interval spolehlivosti pro hodnotu Y_i vypočtenou z regresní rovnice. Dolní a horní mez intervalu spolehlivosti hodnoty Y_i , odpovídající hodnotě nezávislé proměnné x_i , lze za předpokladu normálního rozdělení vypočítat dle vztahu:

$$L_{1,2} = Y_i \pm t_{\alpha} \cdot s_{y,x} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(X_i - \bar{x})^2}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}} \quad (29)$$

kde t_{α} hledáme pro počet stupňů volnosti $\nu=n-2$.

5.1.6.3.2 Aplikace metody nejmenších čtverců

Tato metodika zde bude aplikována pro samou destičku jako v předchozí metodě, a sice pro D210 z DP 986.

Nejprve si zjistím z DP 986 průměrné řezné rychlosti a trvanlivost pro všechny 3. zkoušené břity:

číslo břitu	v_c (m/min)	T (min)
1	246,9	73,3
2	310,9	46,3
3	367,3	32,9

Tab.14 : Hodnoty v_c a T pro jednotlivé břity destičky D420

Pro větší přehlednost byla metodika výpočtů koeficientů shrnuta do následující tabulky (viz Tab.15):

Břit	v_c (m/min)	T (min)	$x=\log v_c$	$y=\log T$	$x \cdot y$	x^2	y^2
1	246,9	73,3	2,392521	1,865104	4,462301	5,724157	3,478613
2	310,9	46,3	2,492621	1,665581	4,151662	6,213158	2,77416
3	367,3	32,9	2,565021	1,517196	3,891639	6,579332	2,301883
			$\sum x$	$\sum y$	$\sum(x \cdot y)$	$\sum(x^2)$	$\sum(y^2)$
			7,450163	5,047881	12,5056	18,51665	8,554656
			$(\sum x)^2$	Průměr x			
			55,50492	2,483388			

Tab.15 : Hodnoty potřebné pro další výpočty této metodiky

Pro následující výpočty jsou důležité hodnoty, které jsem shrnul do tabulky *Tab.15*.

Dále bylo třeba pro získání koeficientů lineární regrese dosadit do vztahu (22) pro výpočet koeficientu ***b*** a následně do vztahu (23) pro výpočet koeficientu ***a***:

$$b = \frac{(\sum x) \cdot (\sum y) - n \sum xy}{(\sum x)^2 - n \sum x^2} = -2,01541$$

$$a = \frac{1}{n} (\sum y - b \sum x) = 6,687661$$

Výsledkem této regrese analýzy jsou koeficienty ***a*** a ***b***, přičemž:

$$m = -b = 2,01541$$

$$C_t = 10^a = 4871480,854$$

$$C_v = C_t^{1/m} = 4871480,854^{1/2,01541} = 2080,958$$

Dále by byl proveden výpočet směrodatné odchylky $s_{y,x}$, s_a , s_b , a intervalů spolehlivosti L_a a L_b dle vztahů (24) až (29). Jelikož jsem si kladl za cíl porovnat výsledky konstant Taylorova vztahu a exponentu ***m***, jsou v této práci další výpočty nepotřebné.

V následující tabulce uvádím shrnutí výsledků pro metodu nejmenších čtverců (viz *Tab.16*):

Destička	VBk (mm)	Ct(-)	Cv (-)	m(-)
D210	0,32	$4,872 \cdot 10^6$	2080,958	2,01541

Tab.16 : Hodnoty vypočtené metodou nejmenších čtverců pro D210

5.1.6.4 Tabulkové vyhodnocení obou metod

Metoda	Destička	Ct(-)	Cv (-)	m(-)
Odhadem	D210	$4,31 \cdot 10^6$	2129,28	1,99
MNČ	D210	$4,872 \cdot 10^6$	2080,958	2,01541

Tab.17 : Tabulkové vyhodnocení obou metod zpracování výsledků pro D210

5.2 Řezná keramika

5.2.1 Vlastní zpracování naměřených hodnot

5.2.1.1 Konstanty Taylorova vztahu

V Tab.18 a Tab.19 je souhrn všech deštiček z oxidové a nitridové keramiky, jejich konstant Taylorova vztahu (C_T , C_v), exponentu m , zjištěných kritických opotřebení (VB_k), použitých otáček při měření a v neposlední řadě i počet břitů, kolik bylo při experimentu měřeno.

	řezná destička	DP	VB _k (mm)	C _t (-)	C _v (-)	m (-)	Břítů	Otáčky (min ⁻¹)
1	C-TM-1-5	957	0,35	$3,03 \cdot 10^8$	905,29	2,87	2	450, 710
	C-TM-1-5	980	0,29	$1,27 \cdot 10^8$	713,33	2,84	3	450, 560, 710
2	D210	957	0,32	$1,41 \cdot 10^9$	1026,46	3,04	2	450, 710
	D210	980	0,32	$4,31 \cdot 10^6$	2129,28	1,99	3	450,560,710
	D210	997	0,32	$1,00 \cdot 10^6$	3234,39	1,71	8	450,560,710
	D210	998	0,32	$1,08 \cdot 10^6$	3179,48	1,72	8	450,560,710
	D210f	997	0,62	$2,49 \cdot 10^{26}$	458,12	9,92	2	560, 710
	D210-PG	998	0,32				3	560, 710
3	D220	957	0,34	$2,55 \cdot 10^7$	1734,69	2,29	2	560, 710
	D220	980	0,34	$7,23 \cdot 10^7$	1528,34	2,47	2	560, 710
	D220f	997	0,5	$6,07 \cdot 10^{-4}$	50,89	-1,88	2	560, 710
	D220-PG	998	0,32					
4	D230	957	0,32	$1,84 \cdot 10^6$	2427,87	1,85	2	450, 710
	D230	980	0,32	$2,14 \cdot 10^7$	1564,09	2,29	3	450,560,710
5	KY1615	MOJE	0,32	28750	6187	1,18	3	560,710,900
6	Toshiba	957	0,35	$2,61 \cdot 10^{18}$	608,69	6,61	2	560, 710

Tab.18 : Konstanty Taylorova vztahu, VB_r pro všechny naměřené destičky z OXIDOVÉ keramiky

	řezná destička	DP	VBk (mm)	Ct (-)	Cv (-)	m (-)	Břitů	Otáčky (min ⁻¹)
1	A3 *	997	0,4	$1,82 \cdot 10^5$	1080,58	1,73	3	560, 710
	A3 *	996	0,4	$1,48 \cdot 10^{14}$	552,7	5,17	3	560, 710
2	A4 *	997	0,52	$4,59 \cdot 10^{20}$	532,26	7,58	2	560, 710
	A4 *	996	0,52	$1,65 \cdot 10^{21}$	528,5	7,79	2	560, 710
3	Alpha Sialon	957	0,54	$4,59 \cdot 10^4$	2528,05	1,37	3	450,560,710
	Alpha Sialon	986	0,54	$3,33 \cdot 10^4$	2751,96	1,32	3	450,560,710
4	D400	997	0,4	$3,56 \cdot 10^7$	2728,2	2,2	3	560,710,900
	D400	996	0,4	$2,6 \cdot 10^7$	2792	2,15	3	560,710,900
	D400f	997	0,66	$1,18 \cdot 10^{23}$	542,37	8,44	2	560, 710
	D400f	996	0,66	$8,72 \cdot 10^{22}$	86,88	8,39	2	560,710
5	D420	957	0,4	$6,97 \cdot 10^7$	896,37	2,66	2	450, 710
	D420	986	0,44	$7,02 \cdot 10^7$	1073,85	2,56	5	450,560,710
6	FMG121C	957	0,47	$3,07 \cdot 10^8$	801,52	2,92	2	450, 710
	FMG121C	986	0,53	$1,35 \cdot 10^7$	1116,02	2,34	3	450,560,710
7	FMG122C	997	0,4	$2,91 \cdot 10^4$	49565,59	0,95	4	450,560,710,900
	FMG122C	996	0,4	$2,13 \cdot 10^4$	64927	0,90	4	450,560,710,900
8	FMG134C	957	0,35	$3,04 \cdot 10^5$	2287,24	1,63	2	450, 710
	FMG134C	986	0,5	$7,04 \cdot 10^8$	929,67	2,98	3	450,560,710
9	G-6	957	0,4	$3,32 \cdot 10^7$	907,56	2,54	2	450, 710
	G-6	986	0,47	$1,68 \cdot 10^{11}$	602,57	4,04	3	450,560,710
10	NS260	1021	0,32	482165	2051,3	1,72	3	560,710,900
	NS260C	1021	0,32	186598	3180,14	1,5	3	710,900,1120
11	P1	997	0,5	$1,29 \cdot 10^{10}$	514,06	3,73	4	560, 710
	P1 *	996	0,5	$2,9 \cdot 10^{16}$	459,13	6,2	4	560, 710
12	SL800	957	0,42	$4,40 \cdot 10^8$	658,69	3,07	2	450, 710
	SL800	986	0,4	$1,59 \cdot 10^{13}$	438,75	4,99	5	450,560,710
13	SN300	957	0,38	17800	854,68	1,45	2	450, 710
	SN300	986	0,5	$4,38 \cdot 10^7$	513,19	2,82	5	450,560,710

Tab.19 : Konstanty Taylorova vztahu, VBkr pro všechny naměřené destičky z NITRIDOVÉ keramiky

Poznámka.:

* - hodnoty konstant u takto označených destiček je nutné brát jako velmi orientační, nebyly proměřovány tak, aby se u nich daly tyto koeficienty objektivně dle vzorců spočítat

5.2.1.2 Trvanlivosti při nastavených otáčkách

Tab.20 a Tab.21 sjednocují statistiku naměřené trvanlivosti T (min) při vypočtených průměrných řezných rychlostech v_c (m/min) seříděných dle nastavených otáček stroje n (min⁻¹) a typů řezných destiček. Uvedené otáčky se od skutečných nepatrně liší, to je však do průměrných řezných rychlostí započítáno.

řezná destička	DP	n = 450 min ⁻¹		n = 560 min ⁻¹		n = 710 min ⁻¹		n = 900 min ⁻¹	
		T (min)	Vc (m/min)	T (min)	Vc (m/min)	T (min)	Vc (m/min)	T (min)	Vc (m/min)
C-TM-1-5	957	45,34	238,68			12,59	373,17		
C-TM-1-5	980	22,43	238,6	10	317,7	8,78	372,8		
D210	957	77,55	243,15			36,22	367,82		
D210	980	73,3	246,9	46,3	310,9				
D210	997			53,01	330,35	33,41	430,66		
D210	998	75,12	250,49	53	329,95	31,31	430,71		
D210f	997			34,31	320,77	2,01	427,18		
D210-PG	998								
D220	957			48,94	315,91	33,89	369,35		
D220	980			49	315,8	33,3	369,30		
D220f	997			33,1	325,8	51,74	412,95		
D220-PG	998								
D230	957	55,22	251,05			32,71	369,83		
D230	980	66,7	250,9	38,8	317,7				
KY1615	MOJE			29,57	347,31	23,52	421,95	16,93	500,21
Toshiba	957			100,25	315,47	25,6	373,79		

Tab.20 : Hodnoty T a v_c pro všechny použité otáčky na stroji naměřené pro OXIDOVOU keramiku

řezná destička	DP	n = 450 min ⁻¹		n = 560 min ⁻¹		n = 710 min ⁻¹		n = 900 min ⁻¹	
		T (min)	Vc (m/min)	T (min)	Vc (m/min)	T (min)	Vc (m/min)	T (min)	Vc (m/min)
A3	997			12,17	340,88	4,57	413,30		
A3	996			12,2	314,1	4,5	413,1		
A4	997			38,68	328,6	4,84	432,28		
A4	996			39,4	329,8	4,8	432,1		
Alpha Sialon	957	22,85	252,11	17,03	319	29,04	369,45		
Alpha Sialon	986	22,86	252	17,05	318,9	28,82	369,40		
D400	997			113,65	337,81	60,83	381,49		
D400	996			113,7	337,5	54,8	381,3		
D400f	997			54,55	337,64	8,48	421,01		
D400f	996			54,6	337,36	8,44	420,9		
D420	957	30,26	246,45			9,59	380,98		
D420	986	242,1	13,49	17,48	276,7	11,73	380,90		
FMG121C	957	29,22	254,23			9,65	370,94		
FMG121C	986	31,21	254,1	15,55	320,6	11,24	370,80		
FMG122C	997			103,02	338,27	95,17	418,07		
FMG122C	996	158,3	244,7	103	338,3	95,2	420,6		
FMG134C	957	36,54	251,36			19,85	367,97		
FMG134C	986	49,482	251,3	23,33	319,8	23,82	367,90		
G-6	957	27,24	249,28			11,17	369,83		
G-6	986	35,13	249,2	13,07	313,6	15,58	361,90		
NS260	1021			28,7	288,55	21,17	350,66	14	438,06
NS260C	1021					26,71	354,66	20	442,03
P1	997			7,74	326,31	2,42	425,52		
P1	996			7,5	348,9	4,8	432,1		
SL800	957	17,88	254,94			5,56	373,17		
SL800	986	15,89	254,8	4,89	311,8	4,65	373,10		
SN300	957	5,59	260,59			3,51	360,90		
SN300	986	8,39	242,1	3,76	318,9	9,56	360,80		

Tab.21 : Hodnoty T a v_c pro všechny použité otáčky na stroji naměřené pro NITRIDOVOU keramiku

5.2.1.3 Řezné rychlosti pro dané trvanlivosti

Tab.22 a Tab.23 obsahují řezné rychlosti, které jsem dopočítal dle Taylorova vztahu (6):

$$v_c = \frac{C_v}{T^{\frac{1}{m}}} \left[\text{m} \cdot \text{min}^{-1} \right], \text{ kde } T = 3, 5, 10 \text{ min.}$$

	řezná destička	DP	T=3min	T=5min	T=10min
1	C-TM-1-5	957	610	510	401
	C-TM-1-5	980	484	404	317
2	D210	957	710	600	480
	D210	980	669	949	670
	D210	997	1701	1262	841
	D210	998	1679	1247	834
	D210f	997	410	390	363
	D210-PG	998			
3	D220	957	1070	850	633
	D220	980	979	796	601
	D220f	997	91	120	173
	D220-PG	998			
4	D230	957	1340	1020	698
	D230	980	968	775	573
5	KY1615	MOJE	2430,67	1574,21	873,09
6	Toshiba	957	540	480	426

Tab.22 : Hodnoty řezných rychlosti pro dané trvanlivosti vypočítané pro OXIDOVOU keramiku

	řezná destička	DP	T=3min	T=5min	T=10min
1	A3	997	573	427	286
	A3	996	447	405	354
2	A4	997	460	430	393
	A4	996	458	429	392
3	Alpha Sialon	957	1130	780	470
	Alpha Sialon	986	1196	812	477
4	D400	997	1655	1312	957
	D400	996	1675	1321	957
	D400f	997	476	448	413
	D400f	996	76	72	66
5	D420	957	590	480	373
	D420	986	698	572	441
6	FMG121C	957	550	460	363
	FMG121C	986	698	561	417
7	FMG122C	997	15605	9118	4398
	FMG122C	996	19155	10859	5027
8	FMG134C	957	1170	860	367
	FMG134C	986	643	542	429
9	G-6	957	590	480	366
	G-6	986	459	405	340
10	NS260	1021	1533	1091	689
	NS260C	1021	1081	803	536
11	P1	997	383	334	277
	P1	996	378	348	311
12	SL800	957	450	380	301
	SL800	986	352	318	276
13	SN300	957	400	280	174
	SN300	986	348	290	226

Tab.23 : Hodnoty řezných rychlostí pro dané trvanlivosti vypočítané pro NITRIDOVOU keramiku

5.2.1.4 Trvanlivosti pro dané řezné rychlosti

V Tab.24 a Tab.25 jsou dle Taylorova vztahu (6) vypočtené jednotlivé trvanlivosti pro dané řezné rychlosti, které jsou v rozmezí použitelnosti řezné keramiky 200 až 700 m/min:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \left[\text{m} \cdot \text{min}^{-1} \right], \text{ kde } v_c = 200, 300, 400, 500, 600, 700 \text{ m/min.}$$

	řezná destička	DP	Vc [m/min]					
			200	300	400	500	600	700
1	C-TM-1-5	957	37,06	11,72	5,18	2,75	1,64	1,06
	C-TM-1-5	980	75,42	23,56	10,32	5,44	3,22	2,07
2	D210	957	116,21	58,09	35,52	24,25	17,76	13,64
	D210	980	119,03	59,26	36,13	24,61	17,99	13,80
	D210	997	113,61	50,70	28,60	18,35	12,76	9,39
	D210	998	142,59	41,57	17,34	8,80	5,05	3,16
	D210f	997	3715,20	66,55	3,83	0,42	0,07	0,01
	D210-PG	998						
3	D220	957	137,15	54,19	28,04	16,82	11,08	7,79
	D220	980	149,83	55,04	27,04	15,58	9,93	6,79
	D220f	997	12,86	27,55	47,32	71,99	101,42	135,51
	D220-PG	998	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	D230	957	101,84	48,10	28,25	18,69	13,34	10,03
	D230	980	115,09	45,48	23,53	14,12	9,30	6,53
5	KY1615	MOJE	56,51	35,14	25,06	19,27	15,55	12,98
6	Toshiba	957	1610,02	110,37	16,48	3,77	1,13	0,41

Tab.24 : Hodnoty trvanlivostí pro dané řezné rychlosti vypočítané pro OXIDOVOU keramiku

	řezná destička	DP	Vc [m/min]					
			200	300	400	500	600	700
1	A3	997	19,02	9,43	5,73	3,90	2,84	2,18
	A3	996	187,9	23,10	5,22	1,65	0,64	0,29
2	A4	997	1659,61	76,78	8,67	1,60	0,40	0,12
	A4	996	1960,92	83,31	8,86	1,56	0,38	0,11
3	Alpha Sialon	957	30,56	17,89	12,24	9,12	7,17	5,85
	Alpha Sialon	986	32,31	18,54	12,50	9,21	7,17	5,81
4	D400	997	308,45	126,41	67,13	41,09	27,51	19,60
	D400	996	293,83	122,88	66,20	40,98	27,69	19,88
	D400f	997	4479,08	146,21	12,90	1,96	0,42	0,11
	D400f	996	4313,95	143,70	12,86	1,98	0,43	0,12
5	D420	957	90,30	31,98	15,31	8,65	5,42	3,65
	D420	986	52,78	17,95	8,35	4,61	2,84	1,88
6	FMG121C	957	55,71	21,57	11,00	6,53	4,26	2,97
	FMG121C	986	58,63	17,95	7,75	4,04	2,37	1,51
7	FMG122C	997	189,63	129,01	98,16	79,41	66,78	57,68
	FMG122C	996	180,59	125,38	96,78	79,17	67,19	58,48
8	FMG134C	957	53,98	27,87	17,44	12,12	9,01	7,00
	FMG134C	986	97,84	29,22	12,40	6,38	3,70	2,34
9	G-6	957	47,48	16,95	8,16	4,63	2,91	1,97
	G-6	986	84,95	16,51	5,16	2,10	1,00	0,54
10	NS260	1021	53,14	26,46	16,13	10,99	8,03	6,16
	NS260C	1021	65,97	35,91	23,32	16,69	12,70	10,08
11	P1	997	33,71	7,43	2,54	1,11	0,56	0,32
	P1	996	157,04	12,41	2,14	0,54	0,17	0,07
12	SL800	957	37,96	10,93	4,52	2,28	1,30	0,81
	SL800	986	52,39	6,93	1,65	0,54	0,22	0,10
13	SN300	957	8,20	4,56	3,00	2,17	1,67	1,33
	SN300	986	14,21	4,53	2,01	1,07	0,64	0,42

*Tab.25 : Hodnoty trvanlivostí pro dané řezné rychlosti vypočítané
pro NITRIDOVOU keramiku*

5.2.2 Závěrečné shrnutí syntézy řezné keramiky

V následující tabulce (viz Tab.26) je celkové shrnutí syntézy naměřených hodnot, a to především konstant Taylorova vztahu, exponentu m pro porovnání s tabulkovými hodnotami a posouzení vhodnosti a použitelnosti.

	Oxidová keramika		Nitridová keramika	
	Bez fazetky	S fazetkou	Bez fazetky	S fazetkou
VBk (mm)	0,29 až 0,35	0,5 až 0,62	0,32 až 0,54	0,66
C_T (-)	$1 \cdot 10^6$ až $2,61 \cdot 10^{18}$	$6,07 \cdot 10^{-4}$ až $2,49 \cdot 10^{26}$	$1,78 \cdot 10^4$ až $1,59 \cdot 10^{13}$	$1,18 \cdot 10^{23}$ až $8,72 \cdot 10^{22}$
C_V (-)	608,69 až 3234,39	50,86 až 458,12	438,75 až 49565,6	86,88 až 542,37
m (-)	1,18 až 6,61	-1,88 až 9,92	0,90 až 7,79	8,39 až 8,44
Kusů destiček	14	2	26	2

Tab.26 : Tabulkové shrnutí syntézy naměřených hodnot pro řeznou keramiku

Taylorovy konstanty + exponent	Hodnoty
m (-)	1,2 až 2,5
C_t (-)	10^3 až 10^6
C_v (-)	10^1 až 10^3

Tab.27 : Tabulkové hodnoty konstant Taylorových vztahů pro řeznou keramiku

Výsledky konstant Taylorova vztahu zjištěných zkouškami při obrábění šedé litiny (viz. Tab.26) je možno porovnat s hodnotami konstant Taylorova vztahu, obecně daných (již dříve experimentálně zjištěných, viz. Tab.27). Jak je možno vidět, naměřené hodnoty neodpovídají tabulkovým hodnotám, jsou v patřičně jiném rozsahu.

Výsledky zjištěné pro destičky s fazetkou nelze brát jako určující, neboť od každého druhu jich máme naměřených málo a ze statistického hlediska nelze s tímto počtem zjištěných hodnot dělat nějaké závěry. Mohu však tento druh destičky srovnat s destičkami bez fazetky a určit „přibližně“ jejich vhodnost.

5.3 Slinuté karbidy

5.3.1 Vlastní zpracování naměřených hodnot

5.3.1.1 Konstanty Taylorova vztahu

řezná destička	VBk (mm)	Ct (-)	Cv (-)	m (-)	Břitů	Otáčky (min^{-1})
AC300G	0,22	$2,75 \cdot 10^{11}$	730,28	3,99	3	560,710,900
AG700G	0,32	$2,51 \cdot 10^9$	874,29	3,20	3	560,710,900

Tab.28 : Konstanty Taylorova vztahu, VBk pro naměřené destičky ze SK

5.3.1.2 Trvanlivosti při nastavených otáčkách

Tab.28 sjednocuje statistiku naměřených trvanlivostí T (min) při vypočtených průměrných řezných rychlostech v_c (m/min) seříděných dle nastavených otáček stroje n (min^{-1}) a typů řezných destiček. Uvedené otáčky se od skutečných nepatrně liší, to je však do průměrných řezných rychlostí započítáno.

řezná destička	$n = 560 \text{ min}^{-1}$		$n = 710 \text{ min}^{-1}$		$n = 900 \text{ min}^{-1}$	
	T (min)	Vc (m/min)	T (min)	Vc (m/min)	T (min)	Vc (m/min)
AC300G	38,7	285,46	23,1	348,26	7,3	434,53
AC700G	37,6	282,96	17,2	353,92	8,8	445,69

Tab.29 : Hodnoty T a v_c pro všechny použité otáčky na stroji pro použité SK

5.3.1.3 Řezné rychlosti pro dané trvanlivosti

Tab.30 obsahuje řezné rychlosti, které jsem dopočítal dle Taylorova vztahu (6):

$$v_c = \frac{C_v}{T^{\frac{1}{m}}} \left[\text{m} \cdot \text{min}^{-1} \right], \text{ kde } T = 3, 5, 10 \text{ min.}$$

řezná destička	T=3min	T=5min	T=10min
AC300G	555	488	410
AC700G	620	528	425

Tab.30 : Hodnoty řezných rychlosti pro dané trvanlivosti pro destičky ze SK

5.3.1.4 Trvanlivosti pro dané řezné rychlosti

V Tab.31 jsou dle Taylorova vztahu (6) vypočtené jednotlivé trvanlivosti pro dané řezné rychlosti, které jsou v rozmezí 200 až 700 m/min, stejně jako u řezné keramiky, aby bylo možné následné porovnání.

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \left[\text{m} \cdot \text{min}^{-1} \right], \text{ kde } v_c = 200, 300, 400, 500, 600, 700 \text{ m/min.}$$

řezná destička	Vc [m/min]					
	200	300	400	500	600	700
AC300G	181,23	35,94	11,41	4,68	2,26	1,22
AC700G	114,65	31,45	12,56	6,17	3,45	2,11

Tab.31 : Hodnoty trvanlivostí pro dané řezné rychlosti pro destičky ze SK

5.3.2 Závěrečné shrnutí syntézy slinutých karbidů

V následující tabulce (viz *Tab.32*) je celkové shrnutí syntézy naměřených hodnot, a to především konstant Taylorova vztahu, pro srovnání a posouzení vhodnosti a použitelnosti.

VBk (mm)	Ct (-)	Cv (-)	m (-)	Počet destiček
0,22 až 0,32	$2,51 \cdot 10^9$ až $2,75 \cdot 10^{11}$	730,28 až 874,29	3,19 až 3,99	2

Tab.32 : Tabulkové shrnutí syntézy naměřených hodnot pro SK

Taylorovy konstanty + exponent	Hodnoty
m (-)	2,5 až 5
Ct (-)	10^9 až 10^{13}
Cv (-)	10^2 až 10^3

Tab.33 : Tabulkové hodnoty konstant Taylorových vztahů pro SK

Výsledky konstant Taylorova vztahu zjištěných zkouškami při obrábění šedé litiny (viz *Tab.32*) je možno porovnat s hodnotami konstant Taylorových vztahů, obecně daných (již dříve experimentálně zjištěných, *Tab.33*). Jak je možno vidět, naměřené hodnoty odpovídají tabulkovým hodnotám. Pro porovnání a určení vhodnosti je zapotřebí změřit více destiček při obrábění šedé litiny.

6. Analýza destiček

6.1 Úvod

Analytická studie destiček si klade za cíl vyhodnotit syntetickou studii naměřených hodnot, kde byly mimo jiné shrnuty tabulkovou formou veškeré naměřené hodnoty potřebné pro porovnání a vyhodnocení destiček. Hlavním předpokladem je zaměřit se jednotlivě na oxidovou a nitridovou keramiku, určit jaká má celkově pro obrábění šedé litiny lepší řezné vlastnosti, dále pak vyhodnocení jednotlivých destiček.

6.2 Podmínky vyhodnocení

Pro vyhodnocení, resp. analýzu naměřených destiček jsem v úvahu bral tyto podmínky:

- Hodnotu exponentu m , stejně jako v praktické části, neboť jak už jsem se zmínil, čím nižší je hodnota tohoto exponentu, tím je destička vhodnější pro vyšší řezné rychlosti (je méně citlivá na změnu řezné rychlosti),
- při maximální možné řezné rychlosti nesmí být trvanlivost menší než 5.minut (určuji tím maximální možnou řeznou rychlost pro použití dané keramiky),
- trvanlivost při otáčkách stroje 710 min^{-1} u oxidové i nitridové keramiky, protože tyto byly použity u všech destiček a mohou tedy sloužit pro porovnání, navíc u těchto otáček není tak velké chvění, aby mělo zásadní vliv na vylomení břitu dříve,
- je třeba brát zřetel i na řezné rychlosti při trvanlivostech při kritickém opotřebení destiček a otáčkách stroje 710 min^{-1} , neboť porovnávané trvanlivosti byly zjištěny při rozdílných řezných rychlostech,
- důležité jsou i vypočtené trvanlivosti pro dané řezné rychlosti (volil jsem řadu 200 až 700 m/min), čímž určuji vhodnost použitelnosti pro minimální i maximální řezné rychlosti, respektive rozsah řezných otáček pro neoptimálnější využití.

6.3 Oxidová keramika

Analýza oxidové řezné keramiky vychází ze syntetické studie naměřených hodnot (viz *Tab.18, Tab.20, Tab.22, Tab.24*).

Níže uvedené destičky jsou seřazeny od nejlépe vyhodnocené pro obrábění šedé litiny až po tu nejméně vhodnou.

6.3.1 KY1615

Tato keramická destička byla změřená pouze jednou, a to jen pro 3.břity. Proto hodnocení této destičky nemusí tolik znamenat, jako u více destiček několikrát měřených.

Destička má hodnotu exponentu m ze všech naměřených destiček z oxidové keramiky nejmenší ($m=1,18$), pokud tedy nepočítám destičku D220f s fazetkou, kde vyšla hodnota tohoto exponentu záporná. Je tudíž nejvhodnější pro obrábění při vyšších řezných rychlostech.

Hodnotu řezné rychlosti při trvanlivosti 5.minut má ze všech destiček také nejvyšší ($v_c=1574,21$ m/min). Hodnota kritického opotřebení byla dosáhnuta 0,32, což je pro oxidovou keramiku dle *Tab.21* typické.

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 23,52 min při řezné rychlosti 421,95 m/min, což při vyhodnocení trvanlivosti je předposlední místo v tabulce, ovšem je zde použita skoro nejvyšší řezná rychlost.

6.3.2 D210

Celkem bylo proměřeno 6.destiček, z čehož 1.destička byla s pozměněnou geometrií D210PG a 1.destička s dvojitou fazetkou D210f, aby se otestoval a následně porovnal vliv fazetky na trvanlivost ostří nástroje.

Hodnota kritického opotřebení byla u všech destiček stejná ($VB_k=0,32$). U destičky s fazetkou byla tato hodnota téměř dvojnásobná, což se dalo předpokládat.

Výsledky pro vyhodnocení se statisticky nejlépe jeví u DP 997 a 998, kde je měřeno po 8.břitech a tyto výsledky jsou téměř totožné. U DP 957 vycházejí hodnoty měření odlišné, což může být způsobeno tím, že byly změřeny jen 2.břity, z čehož jeden

při otáčkách 450 min^{-1} , které nejspíše mají vliv na chvění soustruhu a tedy i na trvanlivost bříty.

Hodnota exponentu m vychází pro tuto destičku 1,71, což i spadá do intervalu hodnot pro řeznou keramiku. Destička je tedy také vhodná pro obrábění za vyšších řezných rychlostech, což dokazuje i fakt, že řezná rychlost při trvanlivosti 5.minut je druhá nejvyšší ($v_c=1262 \text{ m/min}$).

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 33,41 min (což je o 10.minut více než u destičky KY1615) při řezné rychlosti $430,66 \text{ m/min}$.

Zkouška destičky s pozměněnou geometrií D210PG nebyla provedena v dostatečném rozsahu pro zjištění trvanlivostní závislosti.

Z měření destičky D210f je možno říci, že fazetka má zásadní vliv na změnu řezné rychlosti a pro vyšší řezné rychlosti je nevhodná. Za řezných rychlostí nízkých, a to v rozmezí 200 až 300 m/min však vykazuje dobrých trvanlivostí ($66,5$ až $3715,2 \text{ min}$).

6.3.3 D230

Celkem byly proměřeny 2.destičky. Výsledky pro vyhodnocení tohoto typu destičky se statisticky nejlépe jeví u DP 980, kdy bylo proměřeno nejenom více břitů, ale i hodnota exponentu m , který má vliv na další konstanty Taylorova vztahu, se počítá v daleko užším intervalu (rozdíl v řezných rychlostech je menší, neboť byly otáčky 450 min^{-1} a 560 min^{-1}), což má za následek mnohem menší chybu.

Hodnota kritického opotřebení je pro obě destičky stejná, tedy $0,32 \text{ mm}$. Hodnota exponentu m činí 2,29 (a nižší), což pořád spadá do intervalu hodnot pro řeznou keramiku. Vliv na řeznou rychlost už je znatelný v porovnání s předchozími destičkami, neboť při trvanlivosti 5.minut už je řezná rychlost $v_c=775 \text{ m/min}$, což je polovina, co snese destička KY1615.

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 32,71 min (což je téměř stejně jako u destičky D210 a o 9.minut více než u destičky KY1615) při řezné rychlosti $369,83 \text{ m/min}$.

6.3.4 D220

Celkem byly proměřeny 4. destičky, z čehož 1. destička byla s pozměněnou geometrií D220PG a 1. destička s dvojitou fazetkou D220f, aby se otestoval a následně porovnal vliv fazetky na trvanlivost ostří nástroje.

Hodnota kritického opotřebení byla u většiny destiček stejná ($VB_k=0,34$), akorát u destičky s fazetkou byla tato hodnota 0,5, což takový rozdíl jako u D210 není.

Podmínky pro vyhodnocení jsou u obou destiček totožné, tudíž volím hodnocení dle DP 957.

Hodnota exponentu m vychází pro tuto destičku 2,29 (a vyšší), což pořád spadá do intervalu hodnot pro řeznou keramiku. Vliv na řeznou rychlost už je znatelný v porovnání s předchozími destičkami, neboť při trvanlivosti 5. minut už je řezná rychlost $v_c=850$ m/min, což je sice více než destička D230, ale rozdíl je v tom, že hodnota m je zde minimální hranicí a u D230 je tato hodnota maximální hranicí (viz *Tab.18*).

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 33,89 min (což je o 10. minut více než u destičky KY1615) při řezné rychlosti 369,35 m/min (v porovnání s destičkou KY1615 však má o dosti menší řeznou rychlost).

Zkouška destičky s pozměněnou geometrií D220PG nebyla provedena v dostatečném rozsahu pro zjištění trvanlivostní závislosti.

Z měření destičky D220f je možno konstatovat, že fazetka má zásadní vliv na změnu řezné rychlosti a pro nižší řezné rychlosti je nevhodná, neboť exponent m vyšel záporný a trvanlivost se zvyšuje s rostoucí řeznou rychlostí (viz *Tab.24*). Tato destička vykazuje při řezné rychlosti 200 m/min trvanlivost 12,86 min a při řezné rychlosti 700 m/min trvanlivost 135,51 min. Je tedy vhodná pro řezné rychlosti 200 m/min a vyšší.

6.3.5 Toshiba

Tato destička vykazuje skoro nejhorší řezné vlastnosti s doposud porovnávaných destiček. Byla však proměřena jen jednou, a to jen dva břity, tudíž nelze brát tyto výsledky jako zcela adekvátní pro hodnocení.

Hodnota kritického opotřebení je 0,35, což je horní hranice opotřebení pro oxidovou keramiku. Hodnota exponentu m činí 6,61 a je daleko za hranicí řezné

keramiky, je v intervalu rychlořezné oceli. Vliv na řeznou rychlost už je tedy značně veliký, neboť při trvanlivosti 5.minut je řezná rychlost pouze $v_c=480$ m/min, což je téměř 3,3 krát méně než, co snese destička KY1615, ovšem pořád více než destička C-TM-1-5.

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 25,6 min při řezné rychlosti 373,79 m/min. V porovnání se všemi předchozími destičkami je to nejméně vzhledem k použité řezné rychlosti a k trvanlivosti. U destičky KY1615 byla sice trvanlivost při těchto otáčkách stroje o něco menší, avšak při řezné rychlosti daleko vyšší.

6.3.6 C-TM-1-5

Tato destička vykazuje nejhorší řezné vlastnosti. Celkem byly proměřeny 2.destičky. Výsledky pro vyhodnocení tohoto typu destičky se statisticky nejlépe jeví u DP 980, kdy bylo proměřeno nejenom více břitů, ale i hodnota exponentu m , která má vliv na další konstanty Taylorova vztahu, se počítá v daleko užším intervalu (rozdíl v řezných rychlostech je menší, neboť byly otáčky 450 min^{-1} a 560 min^{-1}), což má za následek mnohem menší chybu (viz logaritmický diagram *Obr.10*). Z hlediska výsledků hodnot exponentu m a trvanlivostí u obou destiček lze předpokládat, že tu není velká chyba měření, a proto lze brát výsledky za postačující.

Hodnota kritického opotřebení je pro obě destičky rozdílná a můžeme hledat opotřebení v tomto intervalu (0,29 až 0,35). Hodnota exponentu m činí 2,84, což už nespadá do intervalu hodnot pro řeznou keramiku. Vliv na řeznou rychlost už je znatelný v porovnání s předchozími destičkami, neboť při trvanlivosti 5.minut už je řezná rychlost $v_c=404,75$ m/min, což je téměř 3,9 krát méně než, co snese destička KY1615.

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 8,78 min při řezné rychlosti 372,8 m/min, což je v porovnání se všemi destičkami nejmenší trvanlivost.

6.4 Nitridová keramika

Analýza nitridové řezné keramiky vychází ze syntetické studie naměřených hodnot (viz *Tab.19, Tab.21, Tab.23, Tab.25*).

Níže uvedené destičky jsou seřazeny dle nejlépe vyhodnocené pro obrábění šedé litiny až po tu nejméně vhodnou.

6.4.1 FMG122C

Tato destička vykazuje nejlepší řezné vlastnosti z nitridové keramiky. Celkem byly proměřeny 2.destičky, každá po 4.břitech. U obou destiček byly téměř stejné hodnoty, proto je lze brát za statisticky vhodné.

Hodnota kritického opotřebení je 0,4. Hodnota exponentu m , je pod dolní hranicí hodnot pro řeznou keramiku ($m=0,90$). Znamená to, že řezná rychlost nemá podstatný vliv na opotřebení a lze obrábět vyššími řeznými rychlostmi. Při trvanlivosti 5.minut je řezná rychlost $v_c=10859$ m/min, což je téměř 7 krát větší rychlost než co snese destička KY1615 (destička s nejvyšší řeznou rychlostí u oxidové keramiky).

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 95,2 min při řezné rychlosti 420,6 m/min. Řezná rychlost je téměř stejná jako u destičky KY1615, trvanlivost je však 4 krát vyšší.

6.4.2 D400

Celkem byly proměřeny 4.destičky, z čehož 2.destičky byly s dvojitou fazetkou D400f, aby se otestoval a následně porovnal vliv fazetky na trvanlivost ostří nástroje.

Hodnota kritického opotřebení byla stanovena na 0,4. U destičky s fazetkou byla tato hodnota 0,66, což se dalo předpokládat.

Podmínky pro vyhodnocení destiček bez fazetky a s fazetkou jsou stejné, přičemž výsledky se liší jen nepatrně. Proto u D400 volím hodnoty z DP 996 a u D400f z DP 997.

Hodnota exponentu $m=2,15$ vychází pro destičku D400, což spadá stále do intervalu hodnot řezné keramiky. Vliv na řeznou rychlost není stále znatelný. Při trvanlivosti 5.minut už je řezná rychlost $v_c=1321$ m/min, což je o dosti méně než destička FMG122C, avšak stále více než u destičky D210.

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 54,8 min, což je druhá největší hodnota trvanlivosti ze všech keramických destiček.

Z měření je možno říci, že fazetka má zásadní vliv na změnu řezné rychlosti a pro vyšší řezné rychlosti je nevhodná. Za řezných rychlostí nízkých, a to v rozmezí 200 až 300 m/min vykazuje tento druh keramiky s fazetkou dobrých trvanlivostí (143,70 až 4313,95 min).

V porovnání s destičkou KY1615 je tato sice citlivější na změnu řezné rychlosti, avšak za určitých podmínek vykazuje lepší řezné vlastnosti (např. při otáčkách stroje 710 min^{-1}).

6.4.3 ALPHA SIALON

Tato destička vykazuje také dobré řezné vlastnosti. Celkem byly proměřeny 2. destičky, každá po 3. břitech. U obou destiček byly téměř stejné hodnoty, proto je lze brát za statisticky vhodné.

Hodnota kritického opotřebení je 0,54. Hodnota exponentu m , je v intervalu hodnot pro řeznou keramiku ($m=1,32$). Znamená to, že řezná rychlost nemá podstatný vliv na opotřebení a lze obrábět vyššími řeznými rychlostmi. Při trvanlivosti 5. minut je řezná rychlost $v_c=812 \text{ m/min}$, což je v porovnání s předchozí keramikou několikrát menší.

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 28,82 min při řezné rychlosti 369,40 m/min.

6.4.4 NS260, NS260C

Byla proměřena jedna destička s povlakem (NS260C) a jedna bez povlaku (N260). Úkolem je určit jaké chování má destička s povlakem oproti klasické.

Hodnoty kritických opotřebení jsou pro obě stejné, a to 0,32. Hodnota exponentu m je u destičky s povlakem menší ($m=1,5$) než u destičky klasické ($m=1,72$). Při trvanlivosti 5. minut je řezná rychlost u destičky s povlakem $v_c=803 \text{ m/min}$ a u klasické $v_c=1091 \text{ m/min}$.

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 26,71 min u destičky s povlakem a 21,17 min u destičky bez povlaku při téměř stejných řezných rychlostech. Destička bez povlaku má téměř stejné vlastnosti jako destička s povlakem s tím rozdílem, že jí lze použít při vyšších řezných rychlostech (u $T=3 \text{ min}$ je to dokonce až 1533 m/min oproti 1081 m/min u destičky s povlakem). Na změnu řezné rychlosti je citlivější destička bez povlaku.

Obecně lze říci, že tato destička je na obrábění šedé litiny také dobrá, už kvůli své trvanlivosti a použité řezné rychlosti. Navíc nemá takový vliv na změnu řezné rychlosti jako většina nitridové keramiky.

6.4.5 FMG121C

Celkem byly proměřeny 2.destičky tohoto typu, jedna po 3.břitech, druhá po 2.břitech. Vyšly i jiné hodnoty kritického opotřebení (0,47 a 0,53).

Hodnoty exponentu m je 2,34 pro 3.břítovou destičku, ze které vycházím. Hodnota tohoto exponentu stále spadá do intervalu hodnot pro řeznou keramiku. Při trvanlivosti 5.minut je řezná rychlost $v_c=561 \text{ m/min}$, což už není velká řezná rychlost.

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 9,65 min při řezné rychlosti $370,94 \text{ m/min}$, což je v porovnání s předchozími destičkami značný pokles trvanlivosti. Při řezné rychlosti 700 m/min a vyšší už vykazuje destička trvanlivost menší než 3 min a je tudíž pro vyšší řezné rychlosti nevhodná.

6.4.6 FMG134C

Celkem byly proměřeny 2.destičky tohoto typu, jedna po 2.břitech, druhá po 3.břitech. Hodnoty exponentu m byly u obou destiček velmi rozdílné, a to 1,63 a 2,98. Hodnoty kritického opotřebení byly taktéž rozdílné, a to 0,35 a 0,5. Výsledky pro vyhodnocení tohoto typu destičky se statisticky nejlépe jeví u DP 986, kdy je proměřeno nejenom více břitů, ale i hodnota exponentu m , který má vliv na další konstanty Taylorova vztahu, se počítá v daleko užším intervalu (rozdíl v řezných rychlostech je menší, neboť byly otáčky 450 min^{-1} a 560 min^{-1}), což má za následek mnohem menší chybu.

Hodnota exponentu m je 2,98 pro 3.břítovou destičku, ze které vycházím (hodnota pro druhou destičku je příliš rozdílná). Při trvanlivosti 5.minut je řezná rychlost $v_c=542$ m/min, což není největší řezná rychlost.

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 23,82 min při řezné rychlosti 367,9 m/min. Při řezné rychlosti 700 m/min už vykazuje destička trvanlivost menší než 3 min.

Destička tedy není vhodná pro vyšší řezné rychlosti a je už prakticky citlivá na změnu řezné rychlosti. Její neoptimálnější využití je při řezných rychlostech do 300 m/min, maximální řezná rychlost do 600 m/min.

6.4.7 D420

Celkem byly proměřeny 2.destičky tohoto typu, jedna po 2.břitech, druhá po 5.břitech. Vyšly i jiné hodnoty opotřebení (0,4 a 0,44).

Hodnota exponentu m je 2,56 pro 5.břítovou destičku, ze které vycházím (hodnoty pro druhou destičku nejsou příliš rozdílné, z čehož mohu usoudit, že se jedná o dobrý výsledek měření). Při trvanlivosti 5.minut je řezná rychlost $v_c=572$ m/min, což už není žádná velká řezná rychlost.

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 11,73 min při řezné rychlosti 380,98 m/min. Při řezné rychlosti 600 m/min a vyšší už vykazuje destička trvanlivost menší než 3 min a je tudíž pro vyšší řezné rychlosti nevhodná, a to více než předchozí destička.

6.4.8 G-6

Celkem byly proměřeny 2.destičky tohoto typu, jedna po 2.břitech, druhá po 3.břitech. Hodnoty exponentu m byly u obou destiček velmi rozdílné, a to 2,54 a 4,04. Hodnoty kritického opotřebení byly taktéž rozdílné, a to 0,4 a 0,47. Výsledky pro vyhodnocení tohoto typu destičky se statisticky nejlépe jeví u DP 986, kdy je proměřeno nejenom více břitů, ale i hodnota exponentu m , který má vliv na další konstanty Taylorova vztahu, se počítá v daleko užším intervalu (rozdíl v řezných rychlostech je menší, neboť byly otáčky 450 min^{-1} a 560 min^{-1}), což má za následek mnohem menší chybu.

Hodnota exponentu m je 4,04 pro 3.břítovou destičku, ze které vycházím (hodnota pro druhou destičku je příliš rozdílná). Při trvanlivosti 5.minut je řezná rychlost $v_c=405$ m/min, což je malá řezná rychlost.

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 15,58 min při řezné rychlosti 361,9 m/min. Při řezné rychlosti 500 m/min už vykazuje destička trvanlivost menší než 3 min.

Destička tedy není vhodná pro vyšší řezné rychlosti a je hodně citlivá na změnu řezné rychlosti, což je možné dokázat i tím, že při řezné rychlosti 200 m/min dosahuje trvanlivosti 84,95 min a při řezné rychlosti 300 m/min už jen hodnoty 16,51. Její neoptimálnější využití je tedy při řezných rychlostech do 300 m/min, maximálně však do 400 m/min.

6.4.9 SN300

Celkem byly proměřeny 2.destičky tohoto typu, jedna po 2.břitech, druhá po 5.břitech, stejně jako předchozí destička. Vyšly i jiné hodnoty opotřebení (0,38 a 0,5).

Hodnota exponentu m je 2,82 pro 5.břítovou destičku, ze které vycházím (hodnota pro druhou destičku je příliš rozdílná). Při trvanlivosti 5.minut je řezná rychlost $v_c=290$ m/min, což už je opravdu malá řezná rychlost.

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 9,56 min při řezné rychlosti 360,9 m/min. Při řezné rychlosti 400 m/min už vykazuje destička trvanlivost 3 min. Při řezné rychlosti 200 m/min má však destička také malou trvanlivost, a to 14,21 min, což je nejméně ze všech destiček při této nejnižší řezné rychlosti.

Destička tedy není vhodná pro vyšší řezné rychlosti a pro obrábění šedé litiny bych jí nedoporučoval i kvůli její krátké trvanlivosti při nízkých řezných rychlostech.

6.4.10 P1

Celkem byly proměřeny 2.destičky tohoto typu, a to obě po 4.břitech. Hodnoty exponentu m byly u obou destiček velmi rozdílné, a to 3,73 a 6,2. Hodnoty kritického opotřebení však byly stejné, a to 0,5. Výsledky pro vyhodnocení tohoto typu destičky se

nejlépe jeví u DP 997, neboť u té druhé je nutno brát hodnoty konstant orientačně, protože nebyly proměřovány tak, aby se u nich daly tyto hodnoty podle vzorců objektivně spočítat.

Hodnota exponentu m je tedy 3,73, což už je nad horní hranicí hodnot pro řeznou keramiku. Při trvanlivosti 5.minut je řezná rychlost $v_c=334$ m/min, což je poměrně malá řezná rychlost.

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 2,42 min při řezné rychlosti 350,66 m/min, což je nejmenší trvanlivost ze všech destiček za těchto podmínek měření.

Destička tedy není vhodná pro vyšší řezné rychlosti a je hodně citlivá na změnu řezné rychlosti, což je možné dokázat i tím, že při řezné rychlosti 200 m/min dosahuje trvanlivosti 33,71 min a při řezné rychlosti 300 m/min už jen hodnoty 7,43. Při řezné rychlosti 400/min je hodnota trvanlivosti už jen 2,53 min, což už je z praktického hlediska nepoužitelné. Její neoptimálnější využití je tedy při řezných rychlostech do 300 m/min.

6.4.11 SL800

Celkem byly proměřeny 2.destičky tohoto typu, jedna po 2.břitech, druhá po 5.břitech. Hodnoty opotřebení vyšly rozdílné, ovšem jejich interval není tak velký (0,4 a 0,42).

Hodnoty exponentu m je 4,99 pro 5.břítovou destičku, ze které vycházím (hodnoty pro druhou destičku jsou poměrně rozdílné). Což je hodnota vysoká, spadající do hodnot slinutých karbidů a blíží se k hranici hodnot u rychlořezných ocelí. Při trvanlivosti 5.minut je řezná rychlost $v_c=380$ m/min, což je rychlost poměrně malá.

Hodnota trvanlivosti destičky při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 5,56 min při řezné rychlosti 373,17 m/min. Při řezné rychlosti 500 m/min a vyšší už vykazuje destička trvanlivost menší než 3 min a je tudíž vhodná pro nižší řezné rychlosti. Optimálních výsledků dosahuje destička při řezných rychlostech do 300 m/min, i když už zde jsou trvanlivosti velmi nízké.

6.4.12 A3

Celkem byly změřeny 2. destičky tohoto typu. U obou destiček je nutno brát hodnoty konstant jako velmi orientační, neboť nebyly proměřovány tak, aby se u nich daly tyto koeficienty objektivně podle vzorců spočítat. Důkazem je například to, že hodnota exponentu m při téměř stejných podmínkách je velice rozdílná (1,73 a 5,17).

Opotřebení u ubou destiček při otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 4,5 min u jedné a 4,57 min u druhé destičky při téměř stejných řezných rychlostech (413,3 m/min a 413,1 m/min). Je zřejmé, že destička není vhodná pro vysoké řezné rychlosti.

6.4.13 A4

Celkem byly změřeny 2. destičky tohoto typu. Destičky nebyly sice proměřovány tak, aby se u nich daly tyto koeficienty objektivně podle vzorců spočítat, ale hodnota exponentu m při téměř stejných podmínkách je přibližně stejná (7,58 a 7,79), tudíž mohu brát tyto výsledky pro následné vyhodnocení. U obou destiček byly změřeny pouze 2. břity, pro vyhodnocení však použiji destičku s $m=7,58$.

Opotřebení u této destičky při otáčkách stroje 710 min^{-1} dosáhla hodnoty 4,84 min při řezné rychlosti 432,28 m/min. Při trvanlivosti 5 min dosahuje řezné rychlosti 430 m/min. Destička už při řezné rychlosti 500 m/min dosahuje opotřebení 1,6 min. Je tedy nevhodná pro obrábění za vyšších řezných rychlostech. Je výhodné s ní obrábět při řezných rychlostech do 300 m/min.

Destička má nejvyšší hodnotu exponentu m ze všech destiček a její hodnota je v horní hranici intervalu hodnot pro rychlořeznou ocel, blíží se téměř k nástrojové oceli. Znamená to, že destička je na změnu řezné rychlosti velmi citlivá a na vyšší řezné rychlosti nepoužitelná, což je netypické pro řeznou keramiku.

7. Závěr

7.1 Závěr praktického měření v porovnání s ostatními destičkami

Mnou změřená keramická destička KY1615 dosahuje dobrých vlastností vzhledem k porovnání s ostatními destičkami v analytické studii. Hodnota exponentu m je velmi nízká, což znamená, že není tak citlivá na změnu řezné rychlosti. Trvanlivost při kritickém opotřebení je však nižší. Touto keramikou lze však obrábět při vysokých řezných rychlostech, což je z hlediska optimalizace důležité.

Hodnota trvanlivosti změřená při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min⁻¹ je sice nízká, ale jelikož destička nemá zásadní vliv (citlivost) na změnu řezné rychlosti, tak při trvanlivosti 3 min dosahuje hodnot až 2430,67 m/min a u 5 min hodnot 1574,21, což jsou výsledky, které předčí jen jedna destička ze všech změřených, a to FMG122C z nitridové keramiky, která byla vyhodnocena jako destička s nejlepšími řeznými vlastnostmi.

Další závěry a hodnocení této destičky jsou v závěru praktické části (viz *kap.4.5*) a v analytické studii naměřených hodnot (viz *kap.6.4.1*).

7.2 Závěr analyticko-syntetické studie

7.2.1 Vliv dvojité fazetky na řezné vlastnosti

Fazetka má zásadní vliv na řeznou rychlost a tedy i na trvanlivost. Dokazují to i rozdílné a neobvyklé hodnoty exponentu m , kdy byly vypočteny hodnoty tohoto exponentu v intervalu -1,88 až 9,92 (10 je pro nástrojovou ocel).

U destiček D210f a D400f jsou trvanlivosti vysoké při nízkých řezných rychlostech v rozmezí 200 až 300 m/min. Tyto destičky jsou tedy určeny právě pro nízké řezné rychlosti v tomto intervalu a pro vyšší řezné rychlosti nepoužitelné.

Naopak tomu bylo u destičky D220f, kdy se se zvyšující řeznou rychlostí trvanlivost také zvyšovala. Tyto destičky jsou tedy určeny právě pro vysoké řezné rychlosti a pro nízké řezné rychlosti nepoužitelné.

Kritické opotřebení u destiček s fazetkou jsou oproti destičkám bez fazetky razantně vyšší, a to u některé destičky až téměř dvojnásobně.

7.2.2 Porovnání oxidové a nitridové keramiky

Pro porovnání destiček jsem měl k dispozici 16.destiček (6.typů) z oxidové keramiky a 28.destiček (13.typů) z nitridové keramiky, což je pro statistické vyhodnocení dobré a dá se keramika jednotlivých druhů dobře analyzovat. Dobré je i to, že u většiny typů se měřilo více destiček (2 a více).

Oxidová keramika dosahuje menších hodnot opotřebení (0,29 až 0,35) v porovnání s keramikou nitridovou (0,32 až 0,54), viz *Tab.26*.

Hodnoty exponentu m , které jsou pro vyhodnocení destičky nejdůležitější se u oxidové keramiky pohybovaly v rozmezí 1,18 až 6,61 a u nitridové keramiky v rozmezí 0,90 až 7,79, podle jednotlivých typů destiček.

Nejlepší řezné vlastnosti prokázala destička FMG122C z nitridové keramiky, která dosáhla hodnot exponentu $m=0,90$. Touto destičkou lze obrábět při vysokých řezných rychlostech. Při trvanlivosti 3 min by musela být řezná rychlost až 15605 m/min, při 5 min má hodnotu 9118 m/min. V porovnání s nejlépe hodnocenou destičkou KY1615 z oxidové keramiky, je tato lepší.

Pokud do statistik nebudu započítávat tuto destičku, která měla neobvykle dobré hodnoty a budu brát nitridovou keramiku jako celek, tak lze říci, že u nitridové keramiky už při řezné rychlosti 500 m/min má většina destiček malé trvanlivosti, a to v rozmezí 0,54 až 67,13 min. Většina destiček však vykazuje trvanlivost menší než 20 min při této řezné rychlosti. Pro obrábění řeznou rychlostí 500 m/min už dokonce 4.typy destiček, z celkového počtu 13, nejsou použitelné. Pro obrábění řeznou rychlostí 700 m/min a vyšší už jsou vhodné jen 4.typy destiček z celkového počtu 13.

Co se týče oxidové keramiky, je tomu naopak. Pro obrábění řeznou rychlostí 500 m/min jsou použitelné všechny destičky. Pro obrábění řeznou rychlostí 700 m/min jsou vhodné jen 4.typy destiček z celkového počtu 6.

Trvanlivost naměřená při kritickém opotřebení a otáčkách stroje 710 min^{-1} byla u většiny destiček z oxidové keramiky vyšší než u většiny destiček z nitridové keramiky za stejných řezných podmínek.

Je zřejmé, že pokud budu porovnávat oxidovou a nitridovou keramiku jako celek, což si klade za cíl tato práce, tak oxidová keramika je pro obrábění šedé litiny za těchto řezných podmínek lepší z hlediska optimalizace, neboť je možné používat vyšší řezné rychlosti a dosahuje i lepších trvanlivostí.

7.2.3 Porovnání keramiky se slinutými karbidy

Hlavním nedostatkem tohoto porovnání bylo málo změřených typů destiček ze slinutých karbidů, a to 2 (navíc od každého typu jen 1). Ze statistického hlediska je to málo, aby se mohly vyhodnotit patřičné závěry. Mohou se však přibližně porovnat tyto hodnoty s hodnotami řezné keramiky a určit vhodnost použitelnosti.

Slinuté karbidy jsou známy tím, že mají vyšší hodnoty exponentu m , což má za následek jejich vyšší citlivost na řezné rychlosti. Měřením bylo prokázáno, že hodnoty tohoto koeficientu jsou v intervalu hodnot pro slinuté karbidy (2,5 až 5). U dvou destiček byly naměřeny hodnoty 3,19 a 3,99.

Co se týče hodnot kritického opotřebení, u řezné keramiky dosahují hodnot 0,29 až 0,54 (podle typu keramiky) a u slinutých karbidů bylo naměřeno 0,22 a 0,32, takže tyto hodnoty jsou pro slinuté karbidy podstatně nižší.

Jak je patrné z *Tab.31*, je vliv řezné rychlosti podstatně znatelný. Při řezné rychlosti 200 m/min mají trvanlivosti obě destičky dobré, u řezné rychlosti 300 m/min už je však trvanlivost několikrát nižší. Při řezné rychlosti 600 m/min už je u jedné destičky hodnota trvanlivosti pod 3 min, u druhé něco málo přes 3 min.

Je zřejmé, že pro obrábění šedé litiny jsou slinuté karbidy nevhodné, vhodnější je použití řezné keramiky, která dosahuje vyšších řezných rychlostí i trvanlivostí.

7.3 Návrh dalšího postupu studie keramiky

Další studii řezné keramiky bych doporučoval při vyšších řezných rychlostech, které byly v těchto pracích omezené použitým soustruhem SU50, který nedosahoval patřičného výkonu pro použití vyšších řezných rychlostí, posuvů a hloubky řezu. Z tohoto důvodu se nemohla nastavit ani větší hloubka řezu, ani rychlost posuvu, se kterými bylo samozřejmě experimentováno (ukázalo se, že zvýšení těchto parametrů má na výkon stroje vliv).

Dále by bylo vhodné porovnat více destiček ze slinutých karbidů s řeznou keramikou pro dosažení přijatelných závěrů obou těchto používaných nástrojových materiálů při obrábění šedé litiny.

Celá tato studie je časově i finančně velmi nákladná a chceme-li dosáhnout dobrých výsledků, musí být velké množství rozdílných destiček, nejlépe i více destiček stejného druhu.

Bylo by dobré obrábět řeznou keramikou i jiný materiál a následně porovnat výsledky měření s těmito výsledky, aby se zjistily určité odlišnosti a mohly udělat celkové závěry chování řezné keramiky za různých podmínek měření při obrábění různých materiálů.

Nebylo by od věci experimentovat i s destičkami s dvojitou fazetkou, neboť některé vykazují výborné vlastnosti při nízkých řezných rychlostech, některé naopak při vysokých řezných rychlostech (viz *kap. 7.2.1*).

V těchto pracích bylo experimentováno s oxidovou a nitridovou keramikou, nikoli však s keramickými kompozity, které mají díky svému vyztužení vyšší houževnatost, lepší pevnost v tahu, jsou odolnější proti tepelným šokům a proti opotřebení. Proto bych navrhoval jako další postup studie řezné keramiky experimentovat právě s tímto speciálním druhem keramiky.

7.4 Chyby měření

Při měření může vznikat řada chyb, které pak mají za následek „zkreslené“ informace o destičce. Tyto chyby mohou být systematické či náhodné.

Asi největší chybou, a to systematickou, je posuzování velikosti opotřebení VB. Správně by to měl měřit jeden člověk, aby byla tato chyba minimální. To ovšem není tento případ, kdy v každé diplomové práci byly měřeny hodnoty opotřebení někým jiným, proto tato chyba je velice pravděpodobná.

Mezi další patří náhodné chyby, mezi které můžeme zařadit např. chvění soustruhu, a to zejména při nízkých otáčkách (450 min^{-1}). Zde záleželo na druhu řezné keramiky, protože některé nesnesly chvění vůbec a došlo tím k vylomení či velkému opotřebení dříve a u některých se tento vliv nijak zvláště neprojevoval, čímž se prokázaly jako vhodné k přerušovanému řezu.

Další chyba může vzniknout tím, že některé destičky byly vypočteny metodou nejmenších čtverců a některé metodou odhadem.

Další náhodnou chybou může být vliv tvrdosti obráběných vložek. Každá destička byla měřena na jiném obrobku s rozdílnou tvrdostí. Rozsah tvrdostí obrobků byl v intervalu 252,5 až 289,5 HB.

Většinou bylo měřeno několik destiček stejného typu na různých obrocích. Rozdílné hodnoty naměřených trvanlivostí mohou být způsobeny právě touto rozdílnou tvrdostí obrobků. Z hlediska chyb měření, je to negativní, neboť všechny hodnoty lze

určit jen „přibližně“, nikoli přesně. Na druhou stranu, v praxi je to zcela běžné, že kus od kusu má rozdílné tvrdosti. Rozsah obrobků se totiž nepohybuje v tak malém rozmezí, jako v těchto pracích, ale vyrábí se hromadně, tudíž tam může být rozptyl i daleko větší, proto vidím se na tento vliv dívám spíše pozitivně.

7.5 Taylorův vztah

Při praktickém měření (viz *kap.4*) byly trvanlivosti a řezné rychlosti vypočítávány klasickým Taylorovým vztahem a komplexním Taylorovým vztahem. Výsledky byly téměř totožné. Je tedy zřejmé, že hloubka řezu a rychlost posuvu nemá na trvanlivost a řezné rychlosti zásadní vliv a lze tedy při těchto dlouhodobých zkouškách používat klasický Taylorův vztah se zanedbáním těchto parametrů hloubky řezu a_p a posuvu f .

Z důvodu tohoto zjištění tedy nebylo nutné syntézu naměřených hodnot počítat přes komplexní Taylorův vztah.

7.6 Porovnání metodik zpracování naměřených hodnot

Tyto metody byly podrobně probrány v *kap.5.1.6 (Metodika zpracování výsledků)* s následnou aplikací obou metod na jedné břitové destičce. Výsledky zpracování byly vyhodnoceny tabulkovou formou. Dospěl jsem k závěru, že výsledný exponent Taylorova vztahu m , který je u destičky nejdůležitější hodnotou a podle které se nástrojové materiály hodnotí, se lišil jen nepatrně (1,99 pro metodu odhadem a 2,01541 pro metodu nejmenších čtverců). Hodnoty konstant Taylorova vztahu nebyly od sebe také příliš vzdáleny.

Pro určitou pracnost metody nejmenších čtverců bych spíše doporučoval metodu odhadem.

7.7 Začlenění keramiky do progresivních řezných materiálů

Dle hodnot destičky z nitridové keramiky typu FMG122C je zřejmé, že vývoj řezné keramiky je stále se vyvíjející a v budoucnosti může nitridová keramika patřit k nejčastěji používaným materiálům pro obrábění šedé litiny. Hodnota exponentu m , podle které se určuje nástrojový materiál, byla dokonce 0,90, což už se blíží hodnotám polykrystalického diamantu a kubického nitridu boru, které už jsou téměř nepoškoditelné.

Ve srovnání s těmito materiály, snáší řezná keramika (1200°C) větší teploty než PKD (600°C), menší než CBN (1500°C). Ovšem, co se týče řezných rychlostí, tak CBN je vhodný jen pro malé řezné rychlosti. PKD není vhodný pro svou afinitu pro obrábění neželezných materiálů (reaguje s uhlíkem).

Z těchto důvodů je patrné, že řezná keramika bude v zájmu dalšího výzkumu a vývoje, jelikož dosahuje dobrých řezných vlastností a jak prokázala výše zmíněná destička, má již nepatrný vliv na změnu řezné rychlosti při vysokých trvanlivostech.

7.8 Přínos pro praxi

Tato práce shrnuje veškeré poznatky o řezné keramice, ať už teoretické, tak i experimentálně zjištěné.

Dále tato práce obsahuje závěry potřebné pro další experimenty při dlouhodobých zkouškách trvanlivostí, a to jakou metodiku vyhodnocení zvolit a jestli použít komplexní Taylorův vztah či nikoli.

Tato práce může sloužit jako příručka všem, kteří se řeznou keramikou teoreticky zabývají, např. výzkumné ústavy, školy apod. Tuto práci však na druhé straně mohou využít i firmy zabývající se obráběním pro porovnání destiček i jejich výběr (např. firma Škoda-Auto, a.s. obrábí řeznou keramikou vložky válců motoru). Důležité je totiž vědět už jen to, jestli je vhodnější použít pro daný obráběný materiál oxidovou či nitridovou keramiku, a to z hlediska trvanlivostí i používaných řezných rychlostí.

Pro každou společnost je důležité ekonomické hledisko, tedy optimalizace (dosáhnoutí dobré trvanlivosti při vyšších řezných rychlostech). Už z tohoto důvodu může tuto práci využít téměř každý větší strojírenský podnik, neboť řeznou keramikou se obrábí téměř všude.

POUŽITÁ LITERATURA



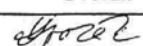
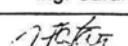
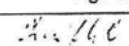
- [1] Kvapil R., Průšek A.: *Řezné nástroje*. 1. vyd. VŠST v Liberci, 1989.
- [2] Humár A.: *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vyd. CCP Brno, 1995.
- [3] <http://cs.wikipedia.org/>
- [4] Holeček V.: *Zkoušky řezné keramiky – výkonová optimalizace*. [Diplomová práce]. TU Liberec 2002. TU Liberec. Fakulta strojní.
- [5] Kunc T.: *Zkoušky řezné keramiky – výkonová optimalizace, rozšíření zkoušek s aplikací na stroj SPT 32-CNC*. [Diplomová práce]. TU Liberec 2004. Fakulta strojní.
- [6] Mrkvička M.: *Výběr keramických řezných materiálů s aplikací v obrábění šedé litiny*. [Diplomová práce]. TU Liberec 2005. Fakulta strojní.
- [7] Sandvik Coromant: *Příručka obrábění*. 1. vyd. Praha 1997.
- [8] Saint-Gobain Advanced Ceramics: *Keramické řezné destičky*. 2008
- [9] Hradec V.: *Zkoušky oxidické řezné keramiky se zirkonem*. [Diplomová práce]. Liberec 2002. TU Liberec. Fakulta strojní.
- [10] Dlouhý R.: *Zkoušky řezné keramiky – nitridová keramika*. [Diplomová práce]. Liberec 2001. TU Liberec. Fakulta strojní.
- [11] Kovalčík J.: *Krátkodobé zkoušky trvanlivosti*. [Ročníkový projekt]. TU Liberec 2008, Fakulta strojní.
- [12] Voborník L.: *Zkoušky oxidické a směsné řezné keramiky*. [Diplomová práce]. Liberec 2003. TU Liberec. Fakulta strojní.
- [13] Cep R.: *Technologie II*. VŠB TU Ostrava. TU Liberec. Fakulta strojní.
- [14] Jersák J.: *Technologie III*. [Přednášky]. TU Liberec. Fakulta strojní.
- [15] Velechovský J.: *Výběr povlakovaných slinutých karbidů s aplikací v obrábění šedé litiny*. [Diplomová práce]. TU Liberec 2005. Fakulta strojní.
- [16] Dejmek J.: *Zkoušky nitridické řezné keramiky*. [Diplomová práce]. TU Liberec 2003. Fakulta strojní.

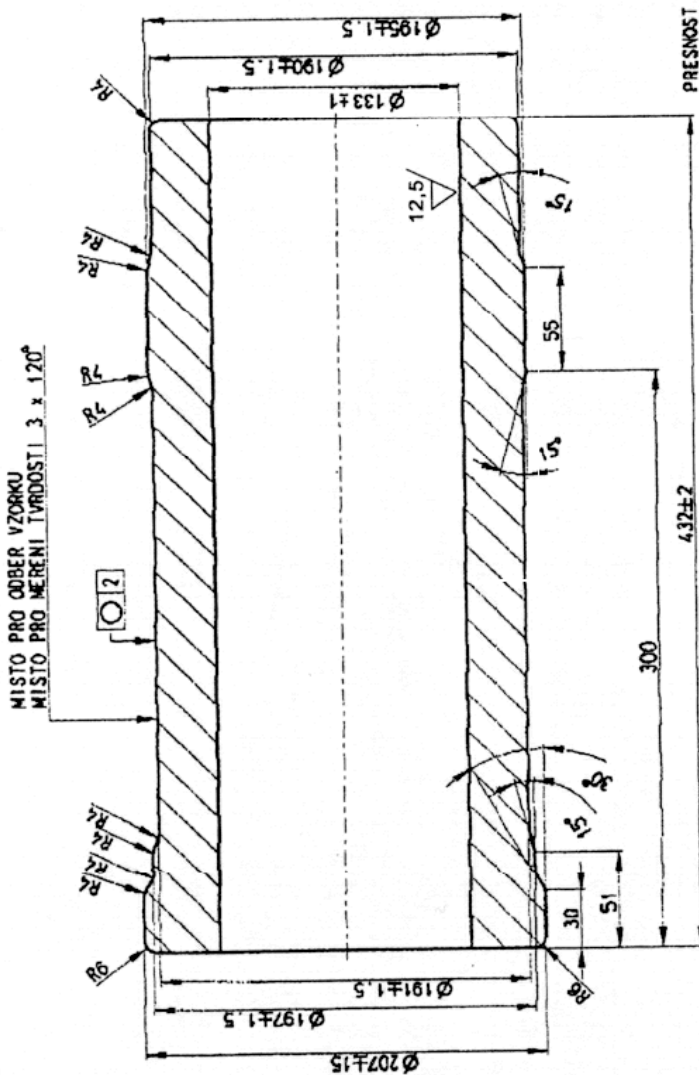
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha	Název	Stran	Obrázků	Tabulek
Příloha 1.	Materiálový list obrobku	1	1	0
Příloha 2.	Výkres obrobku	1	1	0
Příloha 3.	Systém označení destiček	1	1	0
Příloha 4.	Tabulka tvrdostí obrobků	1	0	1
Příloha 5.	Typické vlastnosti vybraných nástrojových materiálů	1	0	1
Příloha 6.	Fyzikální a mechanické vlastnosti whiskerů (keramických kompozitů)	1	0	1

Příloha 1.: Materiálový list obrobku

SLV-Q-09B/2

		MATERIÁLOVÝ LIST ODLITKU VV						Č. 605/130	
Název odlitku : vložený válec , odstředivě litý do pískové formy								Označení : 	
Číslo výkresu odlitku : 605-130-10				Č. v. součásti : 123605200000					
Skupina : 34 . 30 . 12				Odběratel : NORTON DIAS					
Materiál : ČSN 42 24 25 legov.			Kód: Š 25/B		Chemické složení :				
C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Cu + Ni		
3,0 - 3,5	1,6 - 2,4	0,6 - 0,9	max. 0,08	0,3 - 0,5	0,2 - 0,5	0,25 - 0,5	max. 0,55		
PEVNOST V TAHU:		250 MPa minim .		Zkušební tyče podle ČSN 420330 z těles průměru 30 mm odděleně litých do pískové formy					
TVRDOT V HBS :		230 - 280		Brinellova zkouška HBS 10 / 3000 dle ČSN ISO 6506 na těle odlitku v oblasti pracovní části vložky na 3 místech v jedné rovině po 120°					
Vyhodnocení struktury podle ČSN 42 0461, mikrostruktura grafitu dle ČSN EN ISO 945 Struktura pracovní plochy po honování do hloubky 2 % průměru. (u průměru menších než 100 mm minimálně 2 mm)									
Grafit		lupinkový I A , B velikost 4 , 5 (3 ojedinele)							
Perlit		lamelární P 1 Pd 0,5 Pd 1,- Pd 0,3 přípustné							
Steadit		tvoří nesouvislé až souvislé síťoví Fr 2 - Fr 3							
Ferit		povolen do 5 %							
Cementit		nesmí být volně přítomen							
Nepropustnost		Vložené válce musejí být naprosto nepropustné při zkoušce tlakem po celé délce vložky 1,1 - 1,3 MPa po dobu 5 min. petrolejem.							
Pro odlitek vloženého válce platí ČSN 09 3131 včetně norem v ní uvedených.									
Poznámka :									
PŘEVZAL					VYJÁDŘENÍ ZÁKAZNÍKA				
	DNE	PODPIS							
VO - SLV									
ŘKJ - SLV									
TECHNOLOG	DNE	METALURG	DNE	VEDOUcí TPV SLV	DNE	KOPIE č.			
Dvořák		ing. Šafář		ing. Zmátlík	25 67				
	24.1.07		29.01.07		2005				

$$\frac{25}{\Delta} \quad \frac{12,5}{(\Delta)}$$


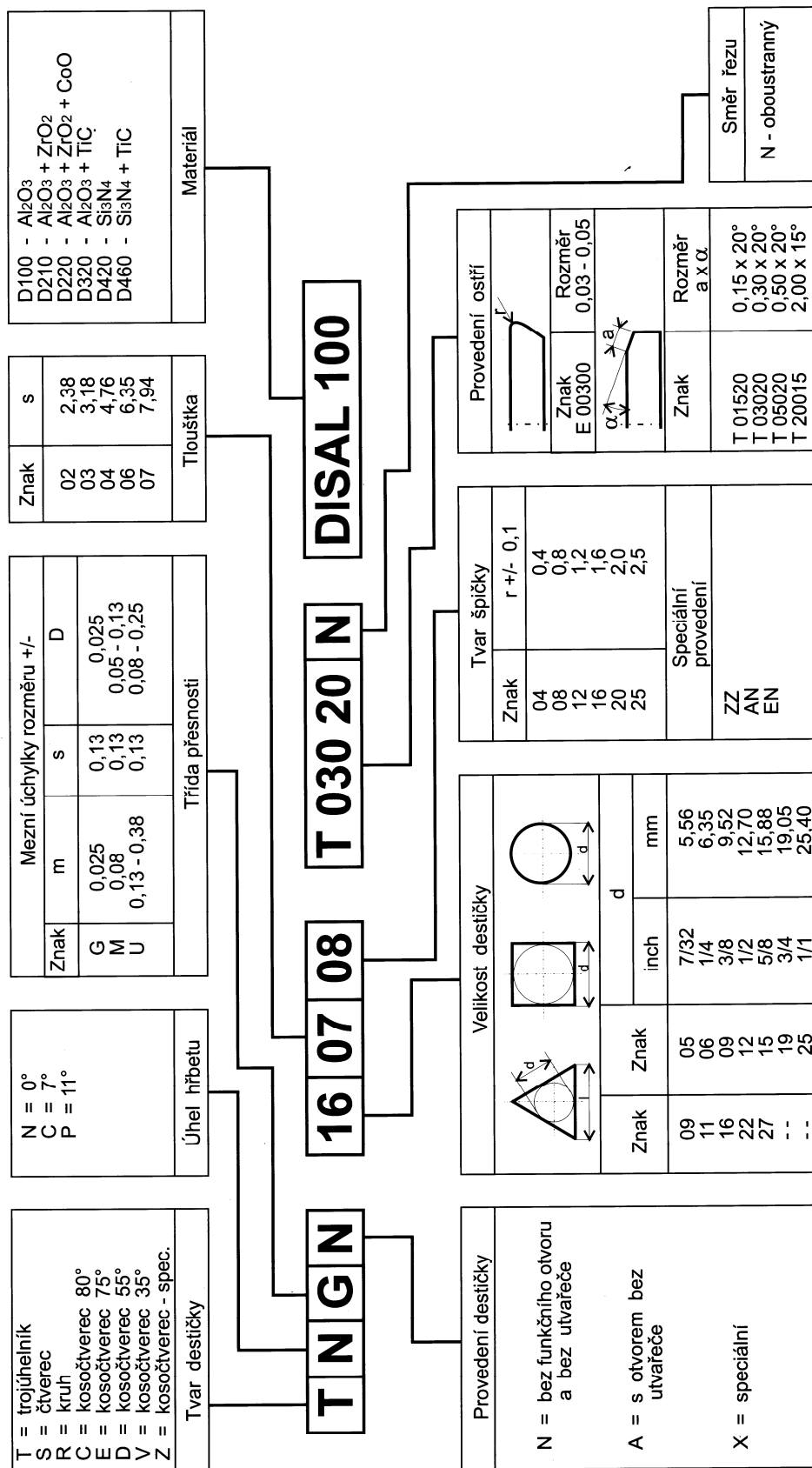
PRESNOST DLE CSN 014470.2
NEPROPUSTNOST ZARUCENA
Ø TVRDOST 230 - 280 MBS

PRO ODLÍTEK VLOŽENÉHO VALCE PLATÍ ČSN 083131
VĚTNE NŮREN V NÍ UVEDENÝCH
POVRCHOVÉ VADY NELZE OPRAVOVAT ZAVAROVANÍM
MATERIÁLOVÝ LÍST JE SOUČASTÍ TOHOTO VÝKRESU

[illegible]

Příloha 3.: Systém označení destiček

ISO 1832 - SYSTÉM OZNAČENÍ DESTIČEK



Příloha 4.: Tabulka tvrdostí obrobků

Obrobek č.*	HB**	Obrobek č.*	HB**
1	275	38	275,5
2	276,5	39	278,5
3	263	40	280
4	275,5	41	283
5	270	42	269
6	281,5	43	277
7	272	44	278,5
8	269	45	272
9	278,5	46	287
10	282	47	269
11	288,5	48	282
12	288,5	49	286,5
13	289,5	50	275
14	288,5	51	286,5
15	288,5	52	281,5
16	285	53	272
17	275	54	275
18	288,5	55	275
19	288,5	56	269
20	282	57	263
21	285	58	269
22	285	59	257,5
23	285	60	266,5
24	272	61	272
25	275,5	62	285
26	285	63	254,5
27	281,5	64	285
28	263,5	65	275
29	269	66	270,5
30	269	67	257,5
31	252,5	68	275
32	272	69	266
33	275	70	288
34	285	71	281,5
35	278	72	268,5
36	285	73	275
37	266		

Poznámka:

* - obrobky jsou seřazeny dle označených čísel, nikoli dle tvrdostí

** - hodnoty HB v tomto sloupci jsou brány jako aritmetický průměr dvou měření, přičemž směrodatná odchylka měření se pohybuje v intervalu 0 až 14,1 HB. U jedné součásti byla tato odchylka až 33,1 HB.

Příloha 5.: Typické vlastnosti vybraných nástrojových materiálů

Vlastnosti		Nástrojový materiál				
		Slinutý karbid WC+Co	Cermety MO ₂ C +TiCN+Ni	Al ₂ O ₃ +ZrO ₂	Al ₂ O ₃ +TiC	Si ₃ N ₄ +přísky
Měrná hmotnost [g.cm ⁻³]		12,0-15,1	5,6-7,0	3,8-4,0	4,2-4,3	3,2-3,4
Pevnost v ohybu [MPa]		1000-2400	1150-1800	600-800	600-900	600-950
Tvrдость	[HV]	1900	2000	1600-2200	1000-2400	1800-2000
	[HRA]	90-92	91-93	91-94	93-95	86-95
Modul pružnosti v tahu [GPa]		520-660	500	340-400	370-420	300-380
Součinitel délkové roztlačnosti [10 ⁻⁶ K ⁻¹]		4,5-7,0	7,0-7,5	7,0-8,5		1,5-3,5
Měrná tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]		80	30	20-30	20-25	30-50
Lomová houževnatost [MPa.m ^{1/2}]		10-17	10	4-6		5-7

Příloha 6.: Fyzikální a mechanické vlastnosti whiskerů (keramických kompozitů)

Vlastnosti	Whiskery SiC				Whiskery Si ₃ N ₄
	ARCO *	TATEHO *	TOKAI *	VERSAR *	TATEHO *
Délka [μm]	10-80	10-40	50-500	20-400	50-300
Průměr [μm]	0,6	0,05-0,20	0,5	1-10	0,2—0,5
Modul pružnosti v tahu [GPa]	680	490	400-700	550	385
Součinitel délkové roztažnosti [10^{-6} K^{-1}]	4,7	4,4-4,7			2,4-2,5
Měrná tepelná vodivost [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]		40,-400			
Pevnost v tahu [GPa]	6,8	21	3-14	18	14

Pozn.: * výrobce